



TUGAS AKHIR - MO 141326

**STUDI NUMERIS DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK
DAN DINAMIKA TEGANGAN SISTEM TALI TAMBAT
SPAR *HELICAL STRAKES* DENGAN VARIASI
KONFIGURASI TALI TAMBAT**

AHMAD FAHCRUDDIN

NRP. 04311440000118

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc.,Ph.D.

Ir. Murdjito, MSc.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2018



FINAL PROJECT - MO141326

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MOTIONS AND MOORING SYSTEM TENSION OF SPAR HELICAL STRAKES WITH VARIATION OF MOORING CONFIGURATION

AHMAD FAHCRUDDIN

NRP. 04311440000118

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, MSc.Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2018

**STUDI NUMERIS DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK DAN
DINAMIKA TEGANGAN TALI TAMBAT SPAR *HELICAL*
STRAKES DENGAN VARIASI KONFIGURASI TALI**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

AHMAD FAHCRUDDIN

04311440000118

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)
2. Ir. Murdjito, MSc.Eng. (Pembimbing 2)
3. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Penguji 1)
4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji 2)

Surabaya, Juli 2018

Studi Numeris dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Tali Tambat SPAR *Helical Strakes* dengan Variasi Konfigurasi Tali

Nama : Ahmad Fahcruddin
NRP : 04311440000118
Departemen : Teknik Kelautan FTK – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, MSc., Ph.D.
Ir. Murdjito, MSc. Eng.

ABSTRAK

SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) merupakan struktur terapung berbentuk silinder yang menjadi alternatif dalam proses laut dalam. dalam perkembangannya *hull* SPAR dipasang *helical strakes* untuk mengurangi gaya gelombang dan arus. Pada Tugas Akhir ini membahas olah gerak bangunana SPAR dengan *helical strakes* dalam kondisi terapung bebas dan tertambat serta tegangan tali tambat SPAR. Olah gerak dan tegangan tali SPAR dianalisa dengan metode numeris dan eksperimen di laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Variasi konfigurasi tali tambat ditinjau untuk mengetahui pengaruh dari perbedaan konfigurasi tali tambat terhadap respon gerakan dan tegangan. RAO (*Response Amplitude Operator*) kondisi tertambat mengalami perubahan yang signifikan baik dari gerakan *surge*, *heave* maupun *pitch*. Konfigurasi tali tambat dengan *taut mooring* memiliki RAO yang lebih kecil dibandingkan dengan *catenary mooring*. Tegangan tali dengan konfigurasi *taut mooring* lebih besar dibandingkan dengan *catenary mooring*. Terdapat penurunan frekuensi alami dari SPAR pada perbandinagn *taut mooring* dengan *catenary mooring* sebesar 0,3246 rad/s menjadi 0,2688 rad/s.

Keywords: SPAR, *Helical Strakes*, Konfigurasi Sistem Tambat, Tegangan Tali, RAO.

Numerical and Experimental Study of SPAR Helical strakes Motion and Mooring Tension Dynamic with Configuration Mooring

Name : Ahmad Fahcruddin
NRP : 04311440000118
Department : Ocean Engineering, FTK – ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, MSc., Ph.D.
Ir. Murdjito, MSc. Eng.

ABSTRACT

SPAR (Single Point Anchor Reservoir) is a slender floating structure that becomes an alternative in deep sea process. In its development the SPAR hull mounted helical strakes to reduce wave and current forces. In this Final Project discusses response SPAR with helical strakes in free floating and moored conditions and mooring tension. Motion and mooring dynamic are studied in numerical and experiment method. Experiment is conducted in Hydrodynamic Laboratory of FTK ITS. Variations of mooring configuration to determine the effect of motion and mooring tension SPAR. RAO (Response Amplitude Operator) taut condition has significant change from either surge, heave or pitch motion. Taut mooring configuration has a smaller RAO compared to catenary mooring. mooring tension with taut configuration is greater than catenary mooring. There is a decrease in the natural frequency of SPAR on the taut mooring to catenary mooring of 0.3246 rad/s to 0.2688 rad/s.

Keywords: *SPAR, Helical Strakes, Configuration Mooring, Mooring Tension, RAO.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah yang Maha Esa karena berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.

Tugas Akhir ini berjudul “*Studi Numeris dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Tali Tambat SPAR Helical Strakes dengan Variasi Konfigurasi Tali Tambat*”. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas Akhir ini secara khusus akan membahas olah gerak dari struktur SPAR yang dianalisa secara numeris dan juga eksperimen serta tegangan tali tambat SPAR. Adanya Tugas Akhir ini diharapkan dapat menambah wawasan pembaca mengenai perilaku gerak SPAR beserta tegangan tali tambatnya.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran guna meningkatkan kemampuan menyusun laporan yang lebih baik lagi ke depannya. Penulis juga berharap semoga Tugas Akhir ini bisa bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, Juli 2018

Ahmad Fahcruddin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian pengerjaan Tugas Akhir dan penulisan laporan ini karena bimbingan, dukungan, serta kebaikan dari seluruh pihak yang ikut andil dalam pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Tanpa bimbingan dan dukungan pihak-pihak tersebut, penulis hampir dipastikan akan mengalami banyak sekali hambatan dalam pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah, Mama dan kedua adik penulis Riski dan Rama yang selalu mendukung baik berupa doa, motivasi dan segala dukungan lainnya.
2. Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D dan Ir. Murdjito, MSc selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan ilmu dan menginspirasi selama kuliah di Teknik Kelautan.
3. Prof. Ir. Mukhtasor, M.Sc. Ph.D. selaku dosen wali penulis yang selalu membimbing dalam kehidupan perkuliahan.
4. Bapak Condro, Mas Rudi dan Mas Hendra selaku teknisi Laboratorium Hidrodinamika ITS yang telah banyak sekali memberikan bantuan dan nasehat selama melaksanakan eksperimen tugas akhir ini.
5. Yudho dan kawan-kawan PPNS yang telah membantu dalam pembuatan instrumentasi. Pak Ali yang telah membantu dalam proses pengolahan data eksperimen.
6. Teman-teman seperjuangan tugas akhir eksperimen SPAR yaitu Grandis, Ian, Bilul dan Agung yang telah bersabar dan berusaha keras selama mengerjakan tugas akhir ini. Banyak sekali kenangan yang tidak akan terlupakan dari awal pengerjaan hingga laporan tugas akhir ini selesai dibuat
7. Teman-teman Hijau Hitam HMI Komisariat Perkapalan Sepuluh Nopember. Cowi, Miko, Mirza, Defi, Majid, Alwi, Mas Bagus, Mas Bayu, Mah Wahyu, Mas Khakim dan teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan namanya satu-satu.
8. Teman-teman pengurus Lab Hidrodinamika ITS 2013, 2014, dan 2015 terutama Mas Ivandhito yang telah menularkan ilmunya, Serta Maelstrom yang selalu memberikan motivasi selama mengerjakan tugas akhir ini.

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	4
1.3. TUJUAN PENELITIAN	5
1.4. MANFAAT	5
1.5. BATASAN MASALAH	5
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN	6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.2. DASAR TEORI.....	12
2.2.1. SPAR Platform	12
2.2.2. Teori Gerakan Bangunan Apung.....	14
2.2.3. Teori Gelombang Airy	15
2.2.4. Beban Hirodinamika.....	16
2.2.5. Dasar Analisa Dinamis	21
2.2.6. Persamaan Gerak	23
2.2.7. <i>Response Amplitude Operator</i>	26
2.2.8. <i>Helical Strakes</i>	28
2.2.9. Sistem Tambat (<i>Mooring System</i>)	29
2.2.10. Teori Pemodelan.....	31

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1.	DIAGRAM ALIR	35
3.2.	PENJELASAN DIAGRAM ALIR.....	39
3.2.1.	Studi Literatur dan Pengumpulan Data	39
3.2.2.	Pemodelan Numeris dan Eksperimen.....	41
3.2.3.	Validasi Model	43
3.2.4.	Rancang Model.....	43
3.2.5.	Kalibrasi Model dan Instrumentasi	45
3.2.6.	Rancang Sistem Tambat	45
3.2.7.	Parameter Sistem Tambat.....	47
3.2.8.	Instrumen Laboratorium	47
3.2.9.	Metode Numeris	49
3.2.10.	Metode Eksperimen.....	50

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1.	PEMODELAN STRUKTUR	55
4.1.1.	Pemodelan Numerik	55
4.1.2.	Pemodelan Eksperimen	58
4.2.	PEMODELAN TALI TAMBAT	65
4.3.	VALIDASI MODEL.....	66
4.3.1.	Validasi Model Numeris.....	66
4.3.2.	Validasi Model Eksperimen	67
4.4.	INSTRUMEN PENGUKURAN	72
4.4.1.	Kalibrasi <i>Gyroscope</i>	72
4.4.2.	Kalibrasi <i>Image Processing</i>	75
4.4.3.	Kalibrasi <i>Load cell</i>	76
4.5.	RAO TERAPUNG BEBAS	78
4.5.1.	Metode Numeris	78
4.5.2.	Metode Eksperimen.....	80
4.5.3.	Perbandingan RAO Metode Numeris dan Eksperimen.....	86
4.5.4.	Perbandingan RAO SPAR dengan <i>Heclical</i> dan tanpa <i>Helical</i>	89
4.6.	RAO TERTAMBAT	91
4.6.1.	Metode Numeris	91
4.6.2.	Metode Eksperimen.....	94

4.6.3.	Perbandingan RAO Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen	100
4.7.	TEGANGAN TALI.....	102
4.7.1.	Metode Numeris	103
4.7.2.	Metode Eksperimen.....	106
4.7.3.	Perbandingan RAO Tegangan Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen	110
4.8.	VARIASI KONFIGURASI TALI TAMBAT	113
4.8.1.	Perbandingan RAO <i>Catenary</i> 1 Numeris dan Eksperimen	115
4.8.2.	Perbandingan RAO Tegangan <i>Catenary</i> 1 Numeris dan Eksperimen	118
4.8.3.	Perbandingan RAO Tertambat Konfigurasi Tali.....	121
4.8.4.	Perbandingan RAO Tegangan Konfigurasi Tali	124

BAB V PENUTUP

5.1.	KESIMPULAN	129
5.2.	SARAN	129

DAFTAR PUSTAKA	131
----------------------	-----

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. <i>Neptune</i> SPAR	2
Gambar 1.2. Rencana eksperimen SPAR dengan variasi konfigurasi tali	4
Gambar 2.1. SPAR <i>platform</i>	12
Gambar 2.2. <i>Classic</i> SPAR dengan <i>helical strakes</i>	13
Gambar 2.3. Konfigurasi <i>Truss</i> SPAR	14
Gambar 2.4. Konfigurasi <i>Cell</i> SPAR	14
Gambar 2.5. Enam Gerakan Bangunan Apung	15
Gambar 2.6. Beban hidrodinamika pada struktur	17
Gambar 2.7. Persamaan <i>added mass</i> pada beberapa bentuk benda	20
Gambar 2.8. Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung	27
Gambar 2.9. Struktur tambahan untuk mengurangi <i>vortex</i>	28
Gambar 2.10 Sistem tambat tipe <i>catenary</i>	30
Gambar 2.11 Sistem tambat tipe <i>taut</i>	30
Gambar 3.1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir	39
Gambar 3.2. Permodelan model dengan <i>Helical Strakes</i> tampak samping	42
Gambar 3.3. Permodelan model dengan <i>Helical Strakes</i> tampak atas	43
Gambar 3.4. Rencana Model SPAR	44
Gambar 3.5. Desain pemberat dan ulir	44
Gambar 3.6. Rencana sistem tambat yang digunakan pada pengujian model SPAR	45
Gambar 3.7. Jangkar dan <i>Load Cell</i>	46
Gambar 3.8. Model SPAR dengan sistem tambat	46
Gambar 3.9. Diagram Sistem <i>Accelero-gyro</i>	48
Gambar 3.10. Diagram Sistem <i>Load Cell</i> yang digunakan pada eksperimen	48
Gambar 3.11. Kamera dan benda yang ditracking	49
Gambar 3.12. Konfigurasi tali penahan gerak drifting	51
Gambar 3.13. Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat	53
Gambar 3.14. Setup model dengan variasi konfigurasi tali	53
Gambar 4.1. Pemodelan Slinder menggunakan perangkat lunak SOLIDWORK	56
Gambar 4.2. Pemodelan SPAR dengan <i>helical strakes</i> menggunakan perangkat lunak SOLIDWORK	56
Gambar 4.3. Pemodelan SPAR dengan ANSYS AQWA	57
Gambar 4.4. Tampak detail model numeris dengan <i>meshing</i>	58

Gambar 4.5. Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik.....	59
Gambar 4.6. Tampak depan model fisik.....	59
Gambar 4.7. Desain pemberat dan ulir	61
Gambar 4.8. Bahan tali tambat	65
Gambar 4.9. Pengamatan draft atau sarat model SPAR	67
Gambar 4.10. Skenario tes pendulum kondisi 1 perhitungan jari-jari girasi	68
Gambar 4.11. Tes pendulum kondisi 1	69
Gambar 4.12. Skenario tes pendulum kondisi 2 perhitungan jari-jari girasi	69
Gambar 4.13. Tes pendulum kondisi 2	70
Gambar 4.14. Instrumen <i>gyroscope</i>	73
Gambar 4.15. <i>Gyroscope</i> dan geladak saat proses kalibrasi	73
Gambar 4.16. <i>Ouput</i> Arduino pada arah sudut 0° derajat	73
Gambar 4.17. Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk	75
Gambar 4.18. Hasil dan Proses Kalibrasi <i>Image Processing</i>	75
Gambar 4.19. Instrumen <i>load cell</i> dan arah beban	76
Gambar 4.20. Beban kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D), dan 50 g (E)	76
Gambar 4.21. Grafik Kalibrasi tiap <i>Load Cell</i>	77
Gambar 4.22. RAO <i>free floating</i> gerakan <i>surge</i>	78
Gambar 4.23. RAO <i>free floating</i> gerakan <i>heave</i>	79
Gambar 4.24. RAO <i>free floating</i> gerakan <i>pitch</i>	79
Gambar 4.25. Konfigurasi Pengujian Terapung Bebas	80
Gambar 4.26. Model SPAR kondisi <i>free floating</i> dan kode eksperimen	81
Gambar 4.27. Penempatan kamera dan lampu penerangan	81
Gambar 4.28. Time history instrumen image processing gerakan <i>surge</i>	82
Gambar 4.29. Time history instrument image processing gerakan <i>heave</i>	82
Gambar 4.30. Time history instrument <i>gyroscope</i> untuk gerakan <i>pitch</i>	82
Gambar 4.31. FFT respon gerakan pada periode gelombang 2,1 s	83
Gambar 4.32. RAO <i>surge free floating</i> metode eksperimen	84
Gambar 4.33. RAO <i>heave free floating</i> metode eksperimen	85
Gambar 4.34. RAO <i>pitch free floating</i> metode eksperimen	86
Gambar 4.35. Perbandingan RAO <i>surge free floating</i> metode numeris dan eksperimen	86
Gambar 4.36. Perbandingan RAO <i>heave free floating</i> metode numeris dan eksperimen	87

Gambar 4.37. Perbandingan RAO <i>pitch free floating</i> metode numeris dan eksperimen.....	88
Gambar 4.38. Perbandingan RAO <i>surge free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	89
Gambar 4.39. Perbandingan RAO <i>heave free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	90
Gambar 4.40. Perbandingan RAO <i>pitch free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	91
Gambar 4.41. Kondisi Tertambat dalam ANSYS AQWA.....	92
Gambar 4.42. RAO <i>surge</i> tertambat numeris	92
Gambar 4.43. RAO <i>heave</i> tertambat numeris	93
Gambar 4.44. RAO <i>pitch</i> tertambat numeris	94
Gambar 4.45. Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat.....	94
Gambar 4.46. Eksperimen SPAR tertambat	95
Gambar 4.47. <i>Time history</i> gerak <i>surge</i> tertambat	96
Gambar 4.48. <i>Time history</i> gerak <i>pitch</i> tertambat	96
Gambar 4.49. <i>Time history</i> gerak <i>heave</i> tertambat.....	96
Gambar 4.50. RAO <i>surge</i> tertambat eksperimen	97
Gambar 4.51. RAO <i>heave</i> tertambat eksperimen	98
Gambar 4.52. RAO <i>pitch</i> tertambat eksperimen	99
Gambar 4.53. Perbandingan RAO <i>surge</i> tertambat metode numeris dan eksperimen.....	100
Gambar 4.54. Perbandingan RAO <i>heave</i> tertambat metode numeris dan eksperimen.....	101
Gambar 4.55. Perbandingan RAO <i>pitch</i> tertambat metode numeris dan eksperimen.....	102
Gambar 4.56. RAO <i>tension</i> tali tambat I tertambat taut numeris	103
Gambar 4.57. RAO <i>tension</i> tali tambat II tertambat taut numeris.....	104
Gambar 4.58. RAO <i>tension</i> tali tambat III tertambat taut numeris	104
Gambar 4.59. RAO <i>tension</i> tali tambat IV tertambat taut numeris	105
Gambar 4.60. RAO <i>tension</i> tali tambat I tertambat taut eksperimen	107
Gambar 4.61. RAO <i>tension</i> tali tambat II tertambat taut eksperimen	108
Gambar 4.62. RAO <i>tension</i> tali tambat III tertambat taut eksperimen.....	109
Gambar 4.63. RAO <i>tension</i> tali tambat IV tertambat taut eksperimen.....	110
Gambar 4.64. Perbandingan RAO tegangan tali tambat I metode numeris dan eksperimen.....	111

Gambar 4.65. Perbandingan RAO tegangan tali tambat II metode numeris dan eksperimen.....	111
Gambar 4.66. Perbandingan RAO tegangan tali tambat III metode numeris dan eksperimen.....	112
Gambar 4.67. Perbandingan RAO tegangan tali tambat IV metode numeris dan eksperimen.....	113
Gambar 4.68. Variasi konfigurasi tali yang dilakukan pada sistem tambat model SPAR	115
Gambar 4.69. Perbandingan RAO <i>surge catenary</i> 1 metode numeris dan metode eksperimen.....	116
Gambar 4.70. Perbandingan RAO <i>heave catenary</i> 1 metode numeris dan metode eksperimen.....	117
Gambar 4.71. Perbandingan RAO <i>Pitch catenary</i> 1 metode numeris dan metode eksperimen.....	117
Gambar 4.72. Perbandingan RAO tegangan tali tambat I <i>catenary</i> 1	119
Gambar 4.73. Perbandingan RAO tegangan tali tambat II <i>catenary</i> 1	119
Gambar 4.74. Perbandingan RAO tegangan tali tambat III <i>catenary</i> 1	120
Gambar 4.75. Perbandingan RAO tegangan tali tambat IV <i>catenary</i> 1	120
Gambar 4.76. RAO <i>surge</i> variasi konfigurasi tali tambat	121
Gambar 4.77. RAO <i>heave</i> variasi konfigurasi tali tambat.....	123
Gambar 4.78. RAO <i>pitch</i> variasi konfigurasi tali tambat.....	123
Gambar 4.79. Perbandingan RAO tegangan tali tambat I variasi konfigurasi tali	124
Gambar 4.80. Perbandingan RAO tegangan tali tambat II variasi konfigurasi tali	125
Gambar 4.81. Perbandingan RAO tegangan tali tambat III variasi konfigurasi tali	126
Gambar 4.82. Perbandingan RAO tegangan tali tambat IV variasi konfigurasi tali	126

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling</i>	33
Tabel 2.2. <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (lanjutan)</i>	34
Tabel 3.1. Dimensi Mini Spar	40
Tabel 3.2. Data <i>Towing Tank</i> Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.	40
Tabel 3.3. Data Mini SPAR.....	40
Tabel 3.4. Data Lingkungan.	40
Tabel 3.5. Data <i>Helical Strakes</i>	41
Tabel 3.6. <i>Properties</i> tali tambat <i>prototype</i> SPAR.....	47
Tabel 3.7. Periode gelombang eksperimen.....	52
Tabel 4.1. Data dimensi struktur SPAR.	55
Tabel 4.2. Data Syarat batas pemodelan di ANSYS AQWA.....	57
Tabel 4.3. Data distribusi massa mini SPAR	57
Tabel 4.4. Hasil penskalaan model SPAR.....	58
Tabel 4.5. Hasil penimbangan berat material	60
Tabel 4.6. Perhitungan momen inersia massa Pipa PVC	61
Tabel 4.7. Perhitungan momen inersia massa Blok A.....	62
Tabel 4.8. Perhitungan momen inersia massa Blok B.....	62
Tabel 4.9. Perhitungan momen inersia massa <i>topside</i>	62
Tabel 4.10. Perhitungan momen inersia massa ulir.....	63
Tabel 4.11. Perhitungan momen inersia massa <i>helical strakes</i>	63
Tabel 4.12. Posisi pusat massa dari setiap material	63
Tabel 4.13. Pusat massa model	64
Tabel 4.14. Jari-jari girasi model.....	64
Tabel 4.15. Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan.....	64
Tabel 4.16. Properti <i>mooring line</i>	65
Tabel 4.17. Spesifikasi tali tambat eksperimen	65
Tabel 4.18. Spesifikasi tali tambat model fisik	66
Tabel 4.19. Perbandingan kekakuan <i>prototype</i> dengan <i>wire rope</i> acuan	66
Tabel 4.20. Perbandingan dan validasi model numerik dengan data	67
Tabel 4.21. Ukuran-ukuran yang digunakan pada pendulum test	70

Tabel 4.22. Periode dan frekuensi gerak pendulum model kondisi 1 dan 2.....	70
Tabel 4.23. Validasi model fisik	72
Tabel 4.24. Kalibrasi searah jarum jam.....	74
Tabel 4.25. Kalibrasi berlawanan jarum jam.....	74
Tabel 4.26. Persamaan <i>trendline arduino</i>	74
Tabel 4.27. Data kalibrasi tiap load cell	77
Tabel 4.28. Persamaan kalibrasi keluaran <i>load cell</i> dengan beban	78
Tabel 4.29. Karakteristik gelombang eksperimen <i>free floating</i>	81
Tabel 4.30. RAO <i>surge free floating</i> metode eksperimen.....	83
Tabel 4.31. RAO <i>heave free floating</i> metode eksperimen	84
Tabel 4.32. RAO <i>pitch free floating</i> metode eksperimen.....	85
Tabel 4.33. RAO tertinggi <i>surge free floating</i> metode numeris dan eksperimen	87
Tabel 4.34. RAO tertinggi <i>heave free floating</i> metode numeris dan eksperimen	88
Tabel 4.35. RAO tertinggi <i>pitch free floating</i> metode numeris dan eksperimen .	88
Tabel 4.36. RAO tertinggi <i>surge free floating</i> SPAR helical strakes dan tanpa helical strakes	89
Tabel 4.37. RAO tertinggi <i>heave free floating</i> SPAR helical strakes dan tanpa helical strakes	90
Tabel 4.38. RAO tertinggi <i>pitch free floating</i> SPAR helical strakes dan tanpa helical strakes	91
Tabel 4.39. Karakteristik gelombang eksperimen tertambat.....	95
Tabel 4.40. RAO <i>surge</i> tertambat metode eksperimen	97
Tabel 4.41. RAO <i>heave</i> tertambat eksperimen.....	98
Tabel 4.42. RAO <i>pitch</i> tertambat eksperimen	99
Tabel 4.43. RAO tertinggi <i>surge</i> tertambat metode numeris dan eksperimen ...	100
Tabel 4.44. RAO tertinggi <i>heave</i> tertambat metode numeris dan eksperimen...	101
Tabel 4.45. RAO tertinggi <i>pitch</i> tertambat metode numeris dan eksperimen	102
Tabel 4.46. RAO <i>tension</i> maksimum tali tambat taut	105
Tabel 4.47 Data <i>load cell</i> I	106
Tabel 4.48. Data <i>load cell</i> II.....	107
Tabel 4.49. Data <i>load cell</i> III.....	108
Tabel 4.50. Data <i>load cell</i> IV	109
Tabel 4.51. RAO <i>tension</i> tertinggi <i>taut</i> metode numeris dan eksperimen	110
Tabel 4.52. RAO <i>tension</i> tertinggi <i>taut</i> metode numeris dan eksperimen	112
Tabel 4.53. RAO <i>tension</i> tertinggi <i>taut</i> metode numeris dan eksperimen	112

Tabel 4.54. RAO <i>tension</i> tertinggi <i>taut</i> metode numeris dan eksperimen	113
Tabel 4.55. RAO Properties variasi konfigurasi tali	114
Tabel 4.56. Karakteristik gelombang eksperimen tertambat.....	115
Tabel 4.57 RAO konfigurasi <i>catenary mooring</i> 1 metode eksperimen.....	116
Tabel 4.58. RAO tertinggi konfigurasi <i>catenary</i> 1 metode numeris dan metode eksperimen	118
Tabel 4.59. RAO SPAR <i>catenary mooring</i> 1 metode eksperimen.....	118
Tabel 4.60. RAO tegangan tertinggi <i>catenary</i> 1 metode numeris dan metode eksperimen	121
Tabel 4.61. Perbandingan hasil RAO <i>surge</i> variasi konfigurasi tali	122
Tabel 4.62. Perbandingan hasil RAO <i>heave</i> variasi konfigurasi tali.....	122
Tabel 4.63. Perbandingan hasil RAO <i>pitch</i> variasi konfigurasi tali	124
Tabel 4.64. RAO tegangan tertinggi tali metode numeris <i>taut</i> , <i>catenary</i> 1, dan <i>catenary</i> 2.....	127

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A (TABULASI DISTRIBUSI MASSA)

LAMPIRAN B (DESIGN TALI TAMBAT)

LAMPIRAN C (PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR)

LAMPIRAN D (INPUT DAN OUTPUT ANSYS AQWA NUMERIS DAN
TERTAMBAT)

LAMPIRAN E (SCRIPT MATLAB FFT)

LAMPIRAN F (TERTAMBAT *TAUT*)

LAMPIRAN G (TERTAMBAT *CATENARY* 1)

LAMPIRAN H (TERTAMBAT *CATENARY* 2)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi telah merambah ke laut dalam, hal ini merupakan akibat dari berkurangnya cadangan minyak didarat (Niedzwecki, et al., 2000). Struktur anjungan lepas pantai yang digunakanpun juga mulai berubah, struktur terpancang yang biasanya digunakan untuk proses eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi dan gas saat ini telah beralih ke jenis struktur terapung seiring dengan berubahnya tempat cadangan minyak bumi dan gas (Fiddini, 2017). Menurut Li (2012) struktur terapung atau lebih dikenal dengan *floating structure* telah digunakan secara luas untuk produksi minyak dan gas di laut dalam. Struktur terapung jenis SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) merupakan struktur terapung berbentuk silinder yang menjadi alternatif dalam proses eksplorasi dan eksploitasi di laut dalam (Yanuar, 2017). Dalam pemilihan peralatan produksi dan pengeboran, respon gerak yang dihasilkan oleh struktur terapung khususnya gerakan *heave* sangat penting untuk diperhatikan. Salah satu keunggulan struktur SPAR adalah memiliki respon gerakan *heave* dan *pitch* yang kecil (Sudhakar, et al., 2011). Ide struktur terapung jenis SPAR digunakan untuk proses drilling, produksi, dan penyimpanan yang dimulai sejak tahun 1980, sampai saat ini di seluruh dunia terdapat 17 unit SPAR yang telah di instal (Halkyard, et al., 2012).

SPAR adalah bangunan terapung yang memiliki struktur utama berbentuk silinder vertikal (kolom tunggal). Daya apung yang di hasilkan dari struktur ini digunakan untuk menopang beban yang dihasilkan dari atas (*Joint Industry Project*, 1995). SPAR memiliki ciri khas, yaitu kedalaman air tercelup (sarat) yang sangat dalam dan hampir 70% lambungnya terbenam dalam air. Bangunan ini juga disebut sebagai bangunan yang sangat stabil, itu disebabkan karena bangunan ini memiliki titik berat struktur yang berada dibawah letak titik gaya apungnya. SPAR awalnya digunakan sebagai *marker bouy* dan alat ukur data *oceanografi* (Yanuar, 2017). Pada tahun 1976 dibangun *Brent* SPAR

yang digunakan untuk proses penyimpanan minyak dan kegiatan *offloading* di *Brent Field, North sea* (Diaz, 2017). Kemudian pada tahun 1996, SPAR pertama yang digunakan dalam kegiatan produksi hidrokarbon yang bernama *Neptune SPAR*. *Neptune SPAR* dibangun oleh *Oryx Energy* dan CNG yang memiliki laju produksi 35 mbod untuk minyak dan 30 mmcfd untuk gas (Chakrabarti, 2005). Selain itu bangunan SPAR juga mulai dikembangkan untuk fasilitas turbin angin lepas pantai (Karimiad, 2011).

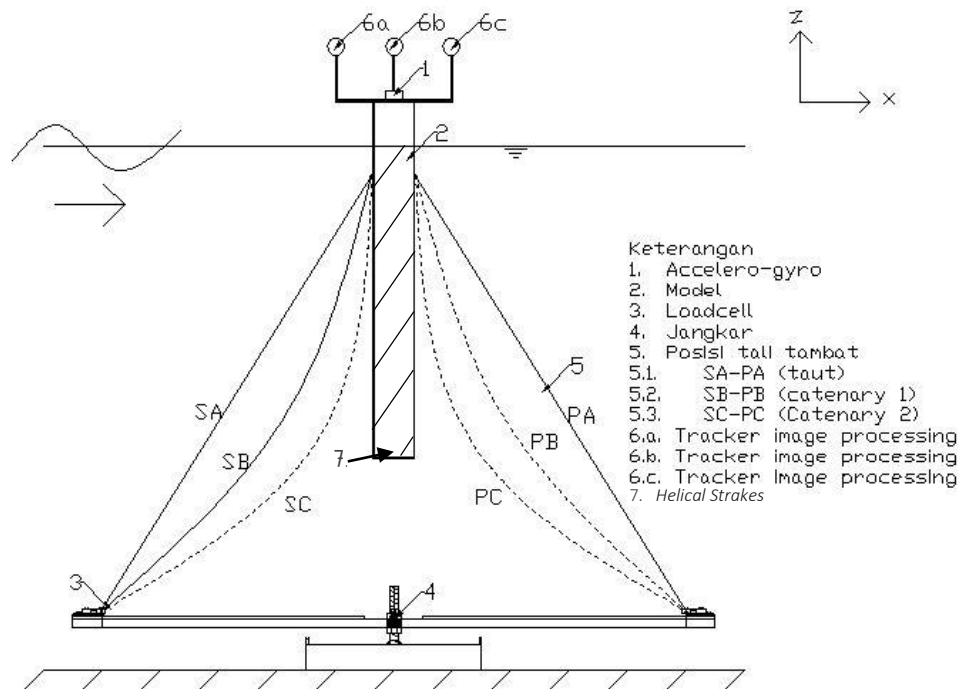


Gambar 1.1. *Neptune SPAR (Rigzone.com)*

Terdapat tiga jenis SPAR yang berkembang, yaitu SPAR tipe *classic*, *truss* dan *cell* (Syukay, 2012). Bangunan SPAR akan mengalami peristiwa *vortex induced motion* (VIM) ketika terkena beban gelombang dan arus akibat dari bentuk bangunan yang silinder panjang tersebut (Kim, 2012). VIM identik dengan *vortex induced vibrations* (VIV), namun karena periode gerakan yang jauh lebih lama, vibrasi getaran yang diinduksi oleh *vortex* lebih sering disebut *vortex induced motions* (Rijken, et al. 2004). Lambung silinder dari SPAR kemudian juga diberikan *helical strake* pada permukaan silinder untuk mendapatkan olah gerak SPAR yang lebih baik (Rho, et al., 2003). Secara umum *spiral strakes* menambah kenaikan koefisien *drag* pada semua gerakan *surge*, *pitch* dan *heave*. Hal itu juga sedikit menambah *added mass* dan gaya gelombang pada lambung SPAR (Kim, 2012).

Salah satu syarat agar bangunan apung dapat beroperasi dengan aman adalah bangunan tersebut harus berada pada posisi yang telah ditentukan, maka dari itu bangunan terapung harus memiliki suatu sistem tambat untuk menahan struktur agar tetap berada di posisinya (*station-keeping*). Respon gerak dari bangunan SPAR akan sangat berpengaruh pada tegangan dari sistem tambat, disisi lain sistem tambat akan mempengaruhi gerak bangunan apung. Jenis sistem tambat yang digunakan akan menentukan respon dinamik bangunan apung termasuk SPAR (Seebai, et al., 2009). Salah satu jenis sistem tambat yang digunakan pada bangunan apung adalah *spread mooring*. *Spread mooring* terbagi atas tiga macam jenis, yaitu *taut-leg mooring system*, *semi taut-leg catenary mooring system* dan *catenary mooring* (Kim, 2012). Sistem tambat yang digunakan pada SPAR adalah sistem tambat konvensional atau *taut catenary mooring lines* (Glanville et al. 1991).

Pada tugas akhir ini, dilakukan studi numeris eksperimen model *Mini-SPAR* dari penelitian *Joint Industry Project* (JIP) yang telah dimodifikasi dengan ditambahkan *helical strakes* pada sisi lambung SPAR. Pada uji eksperimen ini menggunakan 4 buah *mooring line* yang diuji di laboratorium hidrodinamika ITS dengan menggunakan skala 1:125. Variasi konfigurasi tali *mooring line* yang digunakan yaitu dari *taut mooring*, *catenary mooring* 1 dan *catenary mooring* 2. Pengujian dilakukan dengan beban gelombang reguler yang akan berperan sebagai gaya lingkungan. Eksperimen dari variasi konfigurasi tali *mooring line* ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh konfigurasi tali terhadap respon gerak model SPAR dengan ditambahkannya *helical strakes* dalam 3 derajat kebebasan gerakan, yaitu *surge*, *heave*, dan *pitch* serta *tension mooring line* maksimum terjadi pada tali tambat yang dianalisa secara numeris dan eksperimen. Pada metode numeris digunakan analisa *frequency domain* untuk gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* dengan kondisi terapung bebas. Analisa *time domain* digunakan pada numeris tertambat dan eksperimen di laboratorium. Hasil dari uji eksperimen ini disajikan dalam bentuk RAO gerak dan RAO tension yang kemudian dilakukan validasi dengan hasil analisa secara numeris. Analisa numeris pada penelitian ini menggunakan bantuan perangkat lunak *ANSYS AQWA*.



Gambar 1.2. Rencana eksperimen SPAR dengan variasi konfigurasi tali awal
(*Taut, Catenary 1, dan Catenary 2*)

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang menjadi bahan kajian dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana respon gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* struktur SPAR *Helical Strakes* pada kondisi terapan bebas yang ditinjau secara numeris dan eksperimen?
2. Bagaimana respon gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* struktur SPAR *Helical Strakes* pada kondisi tertambat dengan variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) yang ditinjau secara numeris dan eksperimen?
3. Bagaimana tegangan tali tambat pada struktur SPAR *Helical Strakes* yang di hasilkan dari variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) ditinjau secara numerik dan eksperimen?

1.3 TUJUAN

Dari perumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai adalah:

1. Mengetahui karakteristik respon gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* struktur SPAR *Helical Strakes* pada kondisi terapung bebas yang ditinjau secara numeris dan eksperimen.
2. Mengetahui karakteristik respon gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* struktur SPAR *Helical Strakes* pada kondisi tertambat dengan variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) yang ditinjau secara numeris dan eksperimen.
3. Mengetahui tenggangan tali tambat yang terjadi pada struktur SPAR *Helical Strakes* yang dihasilkan dari variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) ditinjau secara numeris dan eksperimen.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat yang didapat dalam penelitian ini adalah mengetahui bagaimana perilaku gerakan SPAR *Helical Strakes* pada mode gerakan arah *surge*, *heave*, dan *pitch* serta *tension* maksimum pada *mooring line* dengan variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) yang dianalisa secara numeris dan eksperimen.

1.5 BATASAN MASALAH

Untuk memperjelas bahasan agar topik yang dibahas tidak melebar dan mempermudah pengerjaan, maka diperlukan batasan masalah dengan adanya ruang lingkup dan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- a. Studi numeris dan eksperimen dilakukan pada model SPAR dari JIP dengan menambahkan *helical strakes*.
- b. Jari-jari girasi di hitung menggunakan perangkat lunak SOLIDWORK.
- c. Permodelan fisik struktur di *set-up* di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan kedalaman *towing tank* 1,8 meter.
- d. Gelombang yang digunakan dalam studi ini adalah gelombang regular.
- e. Teori gelombang yang digunakan adalah teori gelombang airy.
- f. SPAR berada dalam 3 derajat kebebasan (*Surge*, *Heave* dan *Pitch*)
- g. Beban luar yang diperhitungkan hanya beban gelombang.

- h. Asumsi lokasi operasi SPAR disesuaikan dengan kondisi tes dan Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.
- i. Jumlah tali mooring 4 buah dengan tali yang sama.
- j. Arah gelombang yang ditinjau adalah gelombang dengan sudut datang 0° .
- k. Tinggi gelombang yang digunakan untuk eksperimen adalah 5 cm.
- l. Gerakan struktur yang ditinjau adalah *heave*, *surge*, dan *pitch*.
- m. Efek hidrodinamika dari *sub-struktur* tidak diperhitungkan.
- n. Tidak meninjau biaya pada struktur.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Dalam penulisan ini dibuat sebuah sistematika penulisan agar tertata rapi dan memenuhi syarat dalam sistematika penulisan. Sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang penjelasan latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan, manfaat yang diperoleh, serta ruang lingkup penelitian (batasan masalah) untuk membatasi analisis yang akan dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisi referensi, teori dan persamaan pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam penelitian. Referensi tersebut dapat berasal dari jurnal lokal maupun internasional, literatur, tugas akhir terdahulu dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

BAB III METODOLOGI DAN PERCOBAAN

Bab ini berisi tentang metode atau langkah-langkah dalam pengerjaan tugas akhir dengan tujuan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam bentuk diagram alir atau *flow chart* yang dilengkapi dengan penjelasan detail untuk setiap langkah pengerjaannya.

BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang pemodelan struktur dan tali tambat serta validasinya, penggunaan instrumen saat eksperimen, studi analitis yang telah digunakan, studi numeris, studi eksperimen dan studi parametris gerak dan tegangan tali tambat yang mencakup analisis gerakan struktur saat *free floating* maupun saat tertambat dengan variasi konfigurasi tali tambat (*taut*, *catenary 1* dan *catenary 2*)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang merupakan uraian singkat dari keseluruhan hasil penelitian. Uraian singkat ini diharapkan bisa menjawab rumusan masalah yang ada pada Bab I. Pada bab ini juga berisikan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait kedepannya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Studi dinamika gerak SPAR perlu dilakukan untuk mendapatkan konfigurasi tali tambat struktur SPAR yang tepat. Jaelani (2008) melakukan pengujian model klasik SPAR di laboratorium hidrodinamika tentang respon struktur SPAR dengan menggunakan sistem tambat *taut* dan *catenary*. Penelitian dilakukan terhadap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* SPAR tipe klasik dengan hasil sistem tambat *taut* cenderung menghasilkan respon gerak SPAR yang lebih kecil dari pada sistem tambat *catenary*. Selain itu, semakin panjang tali tambat yang digunakan, frekuensi natural gerak model menjadi lebih kecil karena kekakuan dari tali semakin kecil dan massanya juga ikut bertambah (Yanuar, 2017). Sebelum itu penelitian terkait tentang perbandingan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary* juga pernah dilakukan oleh Seebai, et al. (2009) pada sebuah SPAR yang di gunakan untuk turbin angin. Penelitian tersebut meneliti efek dari konfigurasi sistem tambat *taut* dan *catenary* pada SPAR 5MW *wind turbine*. Dari hasil analisa yang telah dilakukan didapatkan bahwa RAO akselerasi horizontal dan vertikal dengan menggunakan sistem tambat *catenary* lebih besar dibandingkan dengan sistem tambat *taut*.

Rachmadiarto, (2008) meneliti bagaimana respon dinamis dari struktur SPAR. Platform SPAR memiliki enam derajat kebebasan dan dihubungkan dengan dasar laut menggunakan *catenary* mooring yang membantu agar SPAR tetap pada posisinya dan menjaga agar struktur ini bergerak dalam batas yang telah ditentukan. Dalam tugas akhir Anastasia (2009) menganalisa gerakan SPAR sebagai struktur pendukung anjungan minyak lepas pantai yang dilakukan secara numerik dengan menggunakan sistem tambat yang berbeda yaitu sistem tambat *catenary* dan sistem tambat *taut*. Dalam Dinaryo, (2016) juga telah meneliti operabilitas SPAR dengan sistem tambat *taut*. Salah satu syarat agar bangunan apung dapat beroperasi dengan aman adalah bangunan tersebut harus berada pada posisi yang telah ditentukan. Alternatif untuk membuat struktur stabil dan tetap berada posisinya adalah dengan penggunaan

heave plate dan sistem tambat ideal (Akhbar, 2015). *Heave plates* dapat menambah *heave damping* 34% - 100 % (Shudakar & Nallayarasu, 2013).

Pengujian model SPAR tipe klasik telah dilakukan oleh *Joint Industry Project* (1995) dan Chen et al (2001). *Joint Industry Project* (1995) melakukan pengujian gerakan dua model SPAR, Consortium SPAR dan Mini SPAR yang memiliki sarat air lebih dangkal. Dari pengujian tersebut didapatkan kesimpulan, SPAR yang memiliki sarat air lebih dangkal merespon gerakan *pitch* lebih besar dari pada SPAR dengan sarat air yang dalam. Sedangkan Chen et al (2001) menemukan semakin dalam perairan semakin besar damping tali tambat, itu dapat mengurangi respon gerakan *surge* dan *pitch* pada SPAR. Islam et al (2011) menganalisa SPAR milik JIP dengan empat titik tali tambat untuk perairan Malaysia dan didapatkan respon gerak yang paling dominan adalah surge sementara untuk respon gerak *pitch*-nya sangat kecil. Zhang et al (2007) juga melakukan pengujian model SPAR, pengujian dilakukan dengan menggunakan gabungan dari tipe *truss* dan tipe *cell* yang kemudian dinamakan *cell-truss* SPAR. Keuntungan dari *cell-truss* SPAR adalah memiliki respon gerak *heave* yang baik dan memudahkan saat konstruksi dan instalasi karena konsep *cell*-nya.

Studi analitis terkait tentang dinamika SPAR telah dilakukan oleh Agarwal, et al. (2003) dan Irani, et al. (2000). Pada penelitian Jose dan Philip (2015), dilakukan analisis efektivitas tali tambat pada platform SPAR. Analisa tersebut dilakukan dengan membandingkan respon gerakan SPAR menggunakan sistem tambat longgar dan kencang atau *catenary* dan *taut*. Pada penelitian ini dihasilkan respon gerak dari sistem tambat longgar (*catenary*) lebih besar 10%-40% dari pada sistem tambat kencang (*taut*) (Jose & Philip, 2015). Analisa numeris juga dilakukan untuk melihat sifat dinamis dari SPAR (Nestegård, et al., 2003). Selain kondisi SPAR terapung bebas, interaksi SPAR dengan adanya sistem tambat juga menjadi perhatian. Ran, et al., (1999). Penelitian tersebut membandingkan interaksi mooring menggunakan dua metode analisa yang berbeda, yaitu analisa berbasis waktu (*time domain simulation*) dan analisa berbasis frekuensi (*frequency domain simulation*).

Peristiwa *vortex induced motion* (VIM) akan dialami oleh SPAR yang diakibatkan oleh gaya gelombang dan arus (kim, 2012). Lambung silinder dari SPAR kemudian diberikan *helical strake* untuk mengurangi peristiwa *vortex induced motion* (Rho, et al., 2003). Secara umum *spiral strakes* menambah kenaikan koefisien *drag* pada semua gerakan *surge*, *pitch* dan *heave*. Hal itu juga sedikit menambah *added mass* dan gaya gelombang pada lambung SPAR (kim, 2012). Ding et, al. (2017) melakukan Penelitian tentang pengaruh *helical strakes* dan parameternya terhadap respon dinamis SPAR Turbin Angin. Dalam penelitiannya membandingkan RAO respons struktur dengan dan tanpa *helical strakes*. Kemudian juga membandingkan gaya yang terjadi pada struktur dengan atau tanpa *helical strakes*. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa pada struktur SPAR dengan *helical strakes* memiliki respon gerakan yang lebih kecil pada gerakan *heave* dan *pitch*, tetapi mengalami sedikit kenaikan pada kondisi *surge* ini diakibatkan karena gaya pada struktur yang naik. Pada penelitian tersebut juga dijeskan bahwa RAO struktur SPAR terpusat pada frekuensi rendah. *Helical strakes* secara signifikan dapat mengurangi respon gerak platform dalam *heave* and *pitch*, dan memperbesar kekuatan gaya gelombang yang terjadi pada platform. Namun, *helical strakes* tidak bisa mengubah respon gerak dan *trend* perubahan gaya gelombang seiring dengan perubahan frekuensi gelombang.

Pada bangunan SPAR, rasio antara dimensi struktur dengan karakteristik panjang gelombang umemnya memiliki desain yang kecil. Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa medan gelombang secara virtual tidak terganggu oleh struktur dan persamaan morison dapat diterapkan untuk menghitung gaya gelombang yang bekerja (Montasir et al, 2016). Persamaan Morison ini dapat digunakan untuk menghitung gaya gelombang gerakan *surge* dan *pitch*. Sedangkan, untuk gerakan *heave* dapat menggunakan persamaan Froude-krylov.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 SPAR Platform

SPAR adalah bangunan terapung yang memiliki struktur utama berbentuk silinder vertikal (kolom tunggal) yang biasanya digunakan untuk melakukan fasilitas pengoboran, produksi, pemrosesan, maupun penyimpanan minyak dan gas bumi pada perairan dalam (Kurian, et al., 2012). Stabilitas SPAR didapat dengan cara merencanakan atau mendesain titik berat total SPAR berada dibawah titik gaya apung (*buoyancy*). Sistem tambat (*mooring system*) ditambahkan pada SPAR untuk menjaga SPAR agar tetap di posisinya (*station-keeping*).



Gambar 2.1 SPAR platform (maritime-connector.com/wiki/platforms)

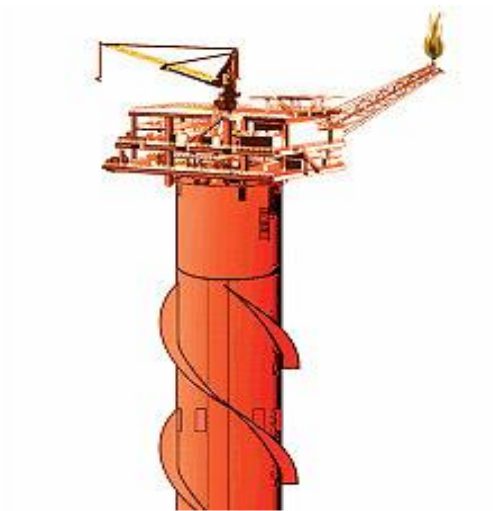
Struktur SPAR memiliki kelebihan yang hampir tidak dimiliki oleh struktur terapung lainnya. Kelebihan dari struktur SPAR dibandingkan dengan struktur angjungan lepas pantai lain, yaitu (Argawal & Jain, 2012) :

1. Dapat digunakan pada kedalaman 3000 m
2. Dapat menopang topside (bangunan atas) yang besar.
3. *Riser* yang digunakan untuk produksi terletak di tengah – tengah *center well*.
4. Selalu stabil karena CoB (Center of Bouyancy) terletak diatas CoG (*Center of gravity*).
5. Dapat mentoleransi berbagai gerakan jika dibandingkan dengan struktur terapung lainnya.
6. Sistem tambat (*mooring system*) yang dengan mudah dipasang, dioperasikan, dan dipindahkan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Islam, et al. (2012) terdapat beberapa macam tipe SPAR yang digunakan, yaitu :

1. *Classic SPAR*

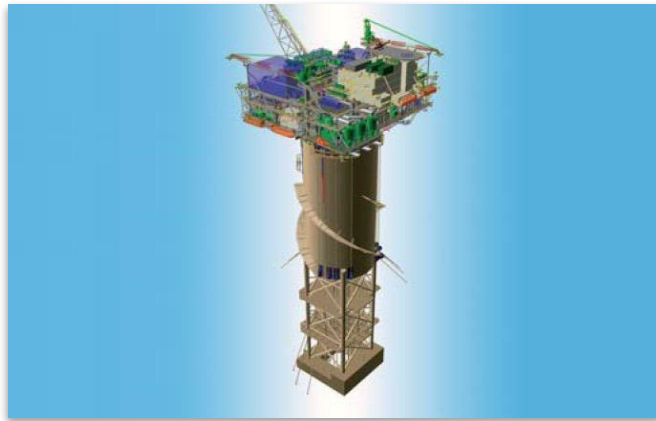
Classic SPAR memiliki *hull* silinder penuh yang fungsinya terbagi menjadi 2 yaitu bagian atas sebagai tempat penyimpanan minyak dan gas dan bagian bawahnya sebagai daya apung (Islam, et al., 2012). Di bagian Tengah dari lambung terdapat rongga yang berbentuk bujur sangkar yang berfungsi sebagai tempat *riser* yang terhubung dari sumur ke bagian *topside*. Untuk mengurangi gerakan yang terjadi pada sisi lambung maka dipasang pelat sirip dari atas ke bawah.



Gambar 2.2. *Classic SPAR* dengan *helical strakes* (Rigzone, 1999)

2. *Truss SPAR*

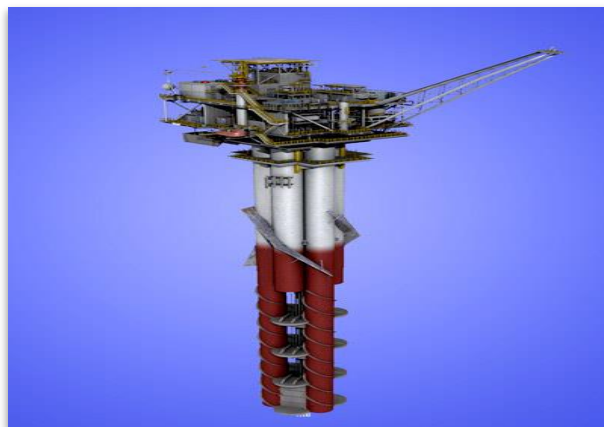
Truss SPAR pertama kali dikenalkan oleh Kerr-McGee pada tahun 2001. *Truss SPAR* didesain memiliki 3 komponen utama yaitu *hard tank*, *truss section* dan *keel tank*. *Hard tank* merupakan penyangga utama *bouyancy* pada *truss SPAR*. Pada *keel tank* terdapat *fixed ballast* yang berfungsi untuk menjaga titik berat SPAR selalu di bawah titik *bouyancy*. *Truss SPAR* ini memiliki lambung silinder vertikal yang lebih pendek jika dibandingkan *classic SPAR*.



Gambar 2.3. Konfigurasi Truss SPAR (Subseaworldnews, 2011)

3. *Cell SPAR*

Cell SPAR memiliki lambung yang terdiri dari silinder –silinder kecil dipasangkan berhimpit dengan satu silinder ditengahnya. Pemasangan silinder kecil akan memudahkan pembangunannya bila dilakukan di galangan dengan fasilitas terbatas. Secara teknis dan ekonomis jenis ini juga lebih efisien karena tidak memerlukan *theter*, sehingga pengikatan hanya menggunakan *semi-taut mooring* sebagai media pengikatannya.



Gambar 2.4. Konfigurasi Cell SPAR (Rigzone, 1999)

2.2.2 Teori Dasar Gerakan Bangunan Apung

Sebagai bangunan apung, SPAR mempunyai gerakan 6 derajat kebebasan. Menurut Bhattacharyya (1978), Gerak bangunan apung tersebut dibagi menjadi 2 kelompok besar, yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Gerakan rotasi dan translasi tersebut adalah:

1. Gerakan translasional

Gerakan translasional adalah gerakan yang searah dengan arah sumbu.

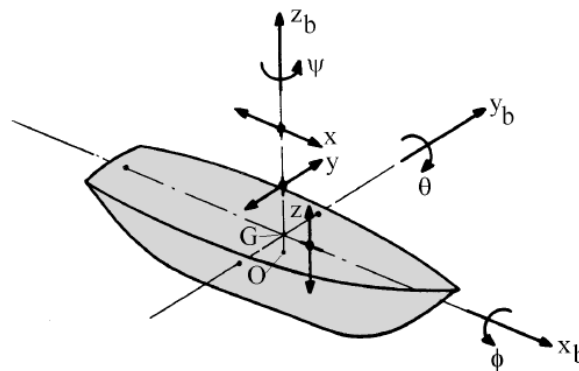
Gerakan translasional terdiri dari :

- *Surging* : gerakan translasi pada arah sumbu x
- *Swaying* : gerakan translasi pada arah sumbu y
- *Heaving* : gerakan translasi pada arah sumbu z

2. Gerakan rotasional

Gerakan rotasional adalah gerakan yang membentuk sudut terhadap sumbu, gerakan rotasional ini terdiri dari :

- *Rolling* : gerakan rotasional terhadap sumbu x
- *Pitching* : gerakan rotasional terhadap sumbu y
- *Yawing* : gerakan rotasional terhadap sumbu z



Gambar 2.5. Enam Gerakan Bangunan Apung (Journée & Massie, 2001)

2.2.3 Teori Gelombang Airy

Teori gelombang Airy merupakan teori gelombang yang paling sering digunakan dalam menghitung beban gelombang (*wave load*) yang terjadi pada struktur dengan mengasumsikan kondisi dasar laut rata dan batasan horisontal pada permukaan bernilai tak hingga. Teori gelombang Airy juga bisa disebut dengan teori gelombang amplitudo kecil, yang menjelaskan bahwa asumsi tinggi gelombang adalah sangat kecil jika dibandingkan terhadap panjang gelombang atau kedalaman laut. Periode gelombang diasumsikan sebagai variabel yang konstan dan tidak berubah terhadap waktu. Jadi jika di laut diukur periode gelombang adalah 10 detik, maka

periodenya akan tetap 10 detik selama gelombang tersebut menjalar. Nama Teori Gelombang Airy merupakan penghargaan kepada Sir.George Biddell Airy (1845) yang telah menemukan teori ini.

Persamaan pada teori gelombang Airy adalah sebagai berikut :

- Kecepatan potensial (ϕ)

$$(\phi) (x,z,d,t) = \frac{g\zeta_o}{\omega} e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

- Kecepatan fluida (v_z)

$$\dot{u} = - \frac{g\zeta_o}{\omega} k e^{kz} \cos(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

- Percepatan fluida (a_z)

$$\ddot{u} = g\zeta_o k e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.3)$$

Keterangan :

ζ_o = amplitudo gelombang

ω = frekuensi alami gelombang

k = angka gelombang

d = kedalaman laut

Adapun asumsi yang dari teori gelombang Airy adalah sebagai berikut :

1. Amplitudo gerakan relatif kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang.
2. Permukaan dasar laut datar dan *impermeable* sehingga kecepatan arah vertikal sama dengan 0.
3. Tekanan pada permukaan air adalah *uniform* dan konstan.
4. Fluida dianggap *irrational*, homogen, *incompressible* dan *non-viscosity*.

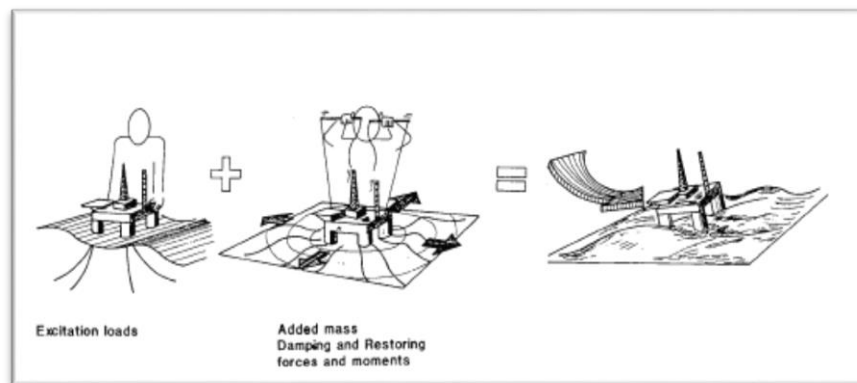
2.2.4 Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung yang berada di laut akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dibagi menjadi dua sub-masalah, yaitu:

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk bersilasi yang berada serta menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara

umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut Froude Krylov Force) dan gaya difraksi.

2. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari sub masalah ini adalah beban massa tambah (added mass), beban redaman (damping) dan beban kekakuan (restoring force). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.



Gambar 2.6. Beban hidrodinamika pada struktur (Faltinsen, 1990)

Sub masalah 1 dan 2 tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga total gaya hidrodinamik pada struktur terapung adalah penjumlahan dari sub-masalah 1 dan sub-masalah 2.

2.2.4.1 Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima dari struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut sebagai gaya Froude-Krylov. Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, keberadaan struktur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan. Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi.

Gaya Froude-Krylov dapat dicari menggunakan persamaan (2.4). Persamaan (2.4) menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan

menggabungkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan berneouli sehingga didapat persamaan (2.5). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks.

$$F_{FK_i} = \int p n_i dA \quad (2.4)$$

Keterangan :

p = Tekanan Gelombang, untuk perairan dalam sesuai dengan persamaan (2.5)

n_i = Vektor satuan arah luasan kecil

dA = Luasan kecil struktur

$$p = \rho g \zeta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.5)$$

Keterangan :

ρ = Massa jenis air sekitar struktur

g = Percepatan gravitasi

ζ_o = Amplitudo gelombang

k = Angka gelombang

z = Posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air

ω = Percepatan sudut gelombang

t = Waktu

x = Posisi di sumbu horizontal, searah dengan arah gelombang.

2.2.4.2 Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi massa, *added mass*, redaman dan kekakuan. Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

a. Massa / *Displacement* SPAR

Massa dari sebuah struktur yang beroperasi di laut dapat dihitung dengan menerapkan konsep hukum Archimedes. Pada penelitian ini, struktur yang dianalisa berupa SPAR dimana massa dari SPAR dapat dihitung dengan mengalikan *volume displacement* dikalikan dengan massa jenis perairan tersebut. Secara matematis, perhitungan massa/*displacement* dari struktur SPAR dapat menggunakan persamaan 2.6 berikut ini.

$$(\Delta) = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times T \times \rho \quad (2.6)$$

dengan,

Δ = massa dari struktur yang tercelup (displacement)

D = diameter struktur

T = Sarat air

ρ = Massa jenis air

b. Added Mass

Bessel (1828) melakukan eksperimen osilasi dalam bentuk pendulum di air dan di udara. Ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Bessel kemudian menginterpretasikan hal ini sebagai masa tambah (*added mass*).

Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung. Ikut Bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah. Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak.

Persamaan (2.7) merupakan formula dari gaya masa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung. Sarpkaya menemukan beberapa nilai masa tambah (a) untuk beberapa bentuk sederhana. Untuk gerak silinder, dengan beberapa orientasi dapat dilihat pada gambar 2.7.



$$F_{ma} = m_{a_i} \ddot{\xi}_i \quad (2.7)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

m_a = massa tambah

$\ddot{\xi}$ = Respon percepatan gerak struktur

	SHAPE	ADDED MASS PER UNIT LENGTH
		← MOTION →
	CIRCLE	$\rho \pi c^2$
	CIRCULAR DISK	$\frac{8}{3} \rho c^3$

Gambar 2.7. Persamaan *added mass* pada beberapa bentuk benda
(Sarpkaya,2010)

c. Gaya/Momen Redaman

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur. Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai persamaan (2.8). Persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai redaman dapat dicari dengan menggunakan analisa numeris (Chakrabakti, 2005).

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.8)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

b = Nilai redaman sistem

$\dot{\xi}$ = Respon kecepatan gerak struktur

d. Kekakuan

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave* (ξ33), *pitch* (ξ44) dan *roll* (ξ55). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatik struktur. Gaya

reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.9). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.9)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

c = Kekakuan struktur

ξ = Respon posisis gerak struktur

Nilai c dari heave, roll dan pitch adalah sebagai berikut :

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.10)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM_T} \quad (2.11)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM_L} \quad (2.12)$$

dengan,

ρ = Massa jenis air sekitar struktur

g = Percepatan gravitasi struktur

A_{wp} = Luas permukaan di garis air

V = Volume displacement struktur

$\overline{GM_T}$ = Panjang metacentre melintang

$\overline{GM_L}$ = Panjang metacentre memanjang

2.2.5 Dasar Analisis Dinamis

Metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai, dapat dibagi menjadi dua yaitu domain frekuensi dan domain waktu. Penjelasan tentang domain frekuensi dan domain waktu adalah sebagai berikut:

1. *Frequency Domain Analysis*

Frequency domain analysis adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. Metode ini bisa digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak, seperti gerakan dan percepatan *platform*, gaya tendon, dan sudut. Setelah mendapatkan koefisien hidrodinamik dan gaya gelombang yang bekerja

pada bangunan apung, maka persamaan gerak untuk single body dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sum_{k=1}^6 [(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta] = Fe^{-i\omega_e t} \quad (2.13)$$

dengan,

M = Massa struktur (*generalized mass*)

A = Massa tambah (*added mass*)

B = Koefisien redaman (*damping*)

C = Koefisien pengembali (*restoring*)

F = Amplitudo gelombang dan komponen momen yang didefinisikan sebagai komponen dari $Fe^{-i\omega_e t}$.

Analisis berbasis ranah frekuensi dilakukan untuk menentukan respon bangunan struktur pada gelombang reguler yang disajikan dalam bentuk *Respon Amplitude Operator*. Keuntungan metode ini adalah tidak membutuhkan banyak waktu untuk perhitungan, *input* dan *output* juga lebih sering digunakan oleh perancang. Kekurangannya adalah untuk setiap persamaan *non-linear* harus diubah menjadi *linear*.

2. *Time domain analysis* (Analisis Dinamis Berbasis Ranah Waktu)

Jika struktur terkandung di dalamnya faktor-faktor non linear, seperti beban gelombang *second order*, *nonlinear viscous damping*, gaya dan momen akibat angin dan arus maka perhitungan akan lebih relevan jika diselesaikan dengan analisis dinamis berbasis ranah waktu (*time domain analysis*).

Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini akan menggunakan prosedur integrasi waktu dan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu $x(t)$. Metode analisis *time domain* umumnya seperti program komputer dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tali tambat dibawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Periode awal harus dimaksimalkan untuk meminimalkan efek transient. Namun, metode ini membutuhkan proses yang lebih kompleks dan waktu yang lama (membutuhkan simulasi *time history*). *Time history* memberikan hasil *tension* maksimum, beban jangkar, dan lain-lain. Persamaan tersebut dideskripsikan sebagai :

$$\sum_{k=1}^6 [(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta] = q_{WI} + q_{WA}^1 + q_{WA}^2 + q_{CU} + q_{xet} \quad (2.14)$$

dengan,

q_{WI} = beban seret angin (*wind drag force*)

q_{WA}^1 = beban gelombang first order

q_{WA}^2 = beban gelombang second order

q_{CU} = beban arus

q_{xet} = beban eksternal lainnya

Output dari simulasi *time domain* adalah:

- Simulasi gelombang reguler dapat digunakan untuk memprediksi fungsi transfer dengan mengambil rasio amplitudo respon dengan input amplitudo gelombang.
- Spektrum respon dapat dihitung dari *time series*, informasi yang diberikan sama dengan analisa domain frekuensi.
- Respon ekstrim dapat disimulasi langsung dari puncak respon selama simulasi.

Keuntungan metode ini dibandingkan *frequency domain* adalah semua tipe *non-linear* (matrik sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Sedangkan kerugiannya adalah membutuhkan waktu perhitungan yang lebih lama. Minimal simulasi *time domain* adalah selama 3 jam.

2.2.6 Persamaan Gerak

Gerak dari bangunan apung dapat dianalisis berdasarkan hukum II Newton yaitu:

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.15)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

$\sum F$ = Resultan gaya

m = Massa struktur

$\ddot{\xi}$ = Percepatan struktur

Persamaan (2.15) menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang dilakukan oleh struktur (Persamaan 2.16 dan 2.17)

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.16)$$

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.17)$$

dengan,

$\sum F$	= Resultan gaya
$F_{eksitasi}$	= Gaya eksitasi gelombang
F_a	= Gaya inersia
F_b	= Gaya redaman
F_c	= Gaya pengembali

Dengan memasukkan persamaan (2.7, 2.8 dan 2.9) ke persamaan 2.17; maka didapatkan persamaan 2.18 dan 2.19 sebagai berikut :

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eksitasi} - (m_{a_i} \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.18)$$

$$(m_i + m_{a_i}) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{eksitasi} \quad (2.19)$$

dengan,

i	= Mode gerak struktur dengan 1 (<i>surge</i>), 2 (<i>sway</i>), 3 (<i>heave</i>), 4 (<i>roll</i>), 5 (<i>pitch</i>) dan 6 (<i>yaw</i>)
$F_{eksitasi}$	= Gaya eksitasi gelombang
m	= Massa struktur
m_a	= massa tambah
$\ddot{\xi}$	= Respon percepatan gerak struktur
b	= Nilai redaman sistem
$\dot{\xi}$	= Respon kecepatan gerak struktur
c	= Kekakuan struktur
ξ	= Respon posisi gerak struktur

Pada kasus bangunan apung yang tertambat persamaan gerak menjadi persamaan 2.20 (Chen X. , 2011)

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (\delta_{nm} m_{jk}^{nm} + m_{a\,jk}^{nm}) - i\omega b_{jk}^{nm} + \delta_{nm} c_{jk}^{nm} + c_{jk}^{*nm} \right] \xi_j = F_j^n \quad (2.20)$$

dengan,

$n = 1, 2, 3 \dots M$ menunjukkan jumlah nth struktur,

δ_{nm} = symbol Kronecker delta, mempunyai nilai 0 jika $n \neq m$ dan 1 jika $n = m$, sehingga \mathbf{M}_{jk}^{mm} and \mathbf{C}_{jk}^{mm} adalah matriks inersia dan hidrostatik dari bangunan m^{th}

$m_{a\,jk}^{nm}$ = matrik massa tambah untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks massa tambah bangunan m^{th} akibat bangunan n^{th} ($n \neq m$),

b_{jk}^{nm} = matrik redaman hidrodinamika untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks redaman hidrodinamika m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$),

c_{jk}^{*nm} = matrik kekakuan untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks kekakuan m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$),

F_j^n = matriks gaya eksitasi pada bangunan n^{th} .

Berdasarkan Van Malree dan Van Boom (1991), komponen eksitasi terdiri dari gaya gelombang orde 1 ($F_{j-wv}^{n(1)}$), gaya gelombang orde 2 ($F_{j-wv}^{n(2)}$), arus (F_{j-c}^n), angin (F_{j-w}^n), mesin pendorong (F_{j-th}^n) dan sistem control lainnya (F_{j-ct}^n) seperti sirip penstabil (*stabilizing fins*). Sehingga matriks gaya eksitasi menjadi

$$\mathbf{F}_j^n = \mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)} + \mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)} + \mathbf{F}_{j-c}^n + \mathbf{F}_{j-w}^n + \mathbf{F}_{j-th}^n + \mathbf{F}_{j-ct}^n \quad (2.21)$$

2.2.7 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu, ζ_{k0} , dengan amplitudo gelombang, ζ_0 . Secara matematis RAO dapat dituliskan sesuai dengan persamaan 2.22:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \quad (2.22)$$

dengan:

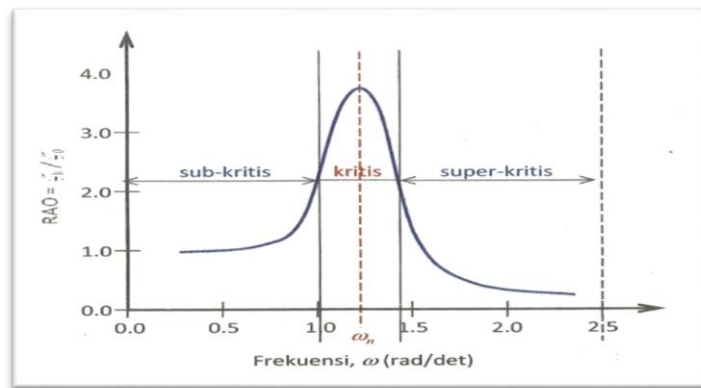
$\zeta_{k0}(\omega)$ = amplitudo struktur (m)

$\zeta_0(\omega)$ = amplitudo gelombang (m)

Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djarmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan 2.22 di atas.

Sedangkan untuk respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang ($k_w = \omega^2/g$) dengan amplitudo gelombang insiden (Djarmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2 / g) \zeta_0} \quad (\text{rad/rad}) \quad (2.23)$$



Gambar 2.8. Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung
(Djarmiko, 2012)

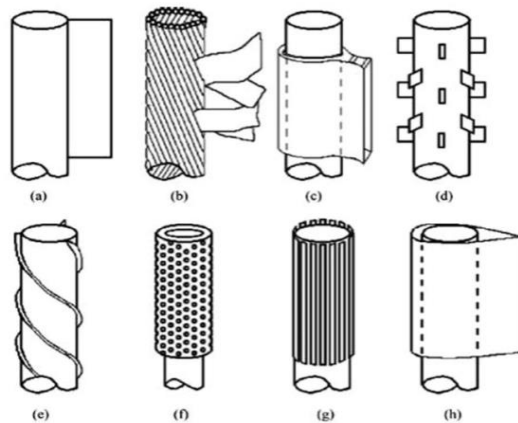
Berdasarkan Gambar 2.8, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau $\omega^2 < k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
- Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
- Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan

memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana $\omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

2.2.8 Helical Strakes

Helical strakes merupakan sebuah piranti yang tempatnya berada pada sebuah lambung atau *hull* struktur SPAR, pipa *riser*, *collom* semi-submersible, dan lain sebagainya. *Helical strakes* dipasangan pada sekeliling silinder, sehingga akan mempengaruhi letak atau lokasi separasi dari aliran (Zdravkovich, 1981). Piranti ini berfungsi untuk memecah aliran fluida yang akan mengakibatkan sebuah *vortex* atau ulean yang terjadi pada sekitar struktur. *Vortex* tersebut akan membuat struktur mengalami suatu fenomena *viv* (*vortex induced vibration*) atau *vim* (*vortex induced motion*). Berikut adalah gambar dari beberapa struktur tambahan yang digunakan untuk mengurangi *viv* (*vortex induced vibration*) atau *vim* (*vortex induced motion*).



Gambar 2.9. Struktur tambahan untuk mengurangi *vortex* (Kwon et al., 2002)

Persamaan untuk mendapatkan periode natural atau frekuensi natural dari struktur lepas pantai yang terdapat *helical strakes* adalah :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{Kz}{M + Maz}} \quad (2.24)$$

Dimana :

$$kz = \rho g(A1 + A2) = \rho g\pi \left(\frac{D1^2 + D2^2}{4} \right) \quad (2.25)$$

M = Massa Struktur

M_{az} = Massa Tambah

Pada persamaan diatas, diameter yang digunakan dalam perhitungan merupakan suatu penjumlahan dari diameter SPAR dengan diameter *helical*. Untuk mendesain *helical strakes* dapat menggunakan penekatan yang sebelumnya telah diteliti oleh Blevins. Persamaan yang di sarankan adalah sebagai berikut :

$$h = 0,05- 0,12 D \quad (2.26)$$

Dimana :

h = Tebal *helical strakes*

D = Diamater hull SPAR

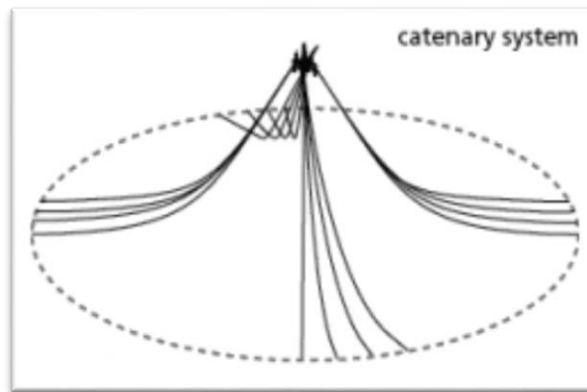
Menurut Wilson dan Tinsley (1989) merekomendasi diameter yang digunakan untuk *helical strakes* adalah 0.1 dari diameter hull SPAR. Kemudian besar sudut antara *helical* dengan aksis silinder adalah 60°, dan jumlah *strakes* adalah 3 buah dengan panjang dari *helical strakes* adalah 3-5 kali diameter hull SPAR.

2.2.9 Sistem Tambat (*Mooring System*)

Sistem tambat (*mooring system*) pada struktur terapung lepas pantai seperti SPAR, TLP, Kapal dan lain-lain berfungsi untuk menjaga posisi struktur supaya tetap berada pada posisinya terhadap gaya-gaya yang bekerja seperti angin, arus dan gelombang ketika beroperasi. Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat pada SPAR berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) yang terdiri dari *catenary mooring* atau *taut mooring*. Sistem tambat pada umumnya terangkai dari sejumlah *lines* yang terbuat dari *chain*, kabel (*wire*), atau tali sintetik (*syntetic rope*). Gaya tension yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya. Tipe-tipe dari sistem tambat pada struktur bangunan apung lepas pantai utamanya SPAR adalah sebagai berikut :

- *Catenary Line Mooring*

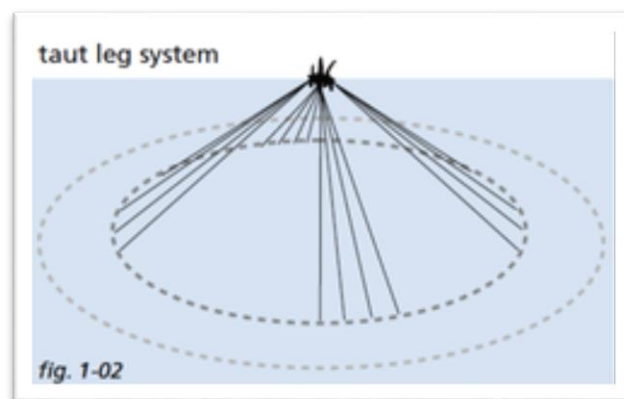
Merupakan sistem tambat pertama yang paling umum. Ketika berada di dasar laut posisi *mooring* horizontal sehingga pada *catenary mooring* ini jangkar hanya dikenakan beban horizontal. Pada *catenary mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.



Gambar 2.10. Sistem tambat tipe *catenary* (abc-moorings,2010)

- *Taut Mooring System*

Sistem tambat ini memiliki konfigurasi mooring lines dengan tali yang tegang. Perbedaan utamanya dengan *catenary mooring* adalah posisi *anchorleg*. *Taut mooring* ketika berada di dasar laut posisi *mooring* nya bersudut sehingga jangkar harus mampu menahan beban yang terjadi baik beban horizontal maupun vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.



Gambar 2.11. sistem tambat tipe *taut* (Engineering,2006)

2.2.10 Teori Permodelan

Dalam melakukan pemodelan suatu prototipe dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida dan interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya.

- Kesamaan geometri

Dalam hal kesamaan geometri, model yang akan dibuat harus memiliki kesamaan dalam bentuk, tetapi berbeda dimensi. Model yang dibuat harus disesuaikan dengan suatu faktor skala sehingga sebanding dengan prototipe yang dijadikan acuan, terutama pada bagian yang terendam. Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan prototipe.

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (2.27)$$

Dimana l_p dan l_m dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan λ merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai λ .

- Kesamaan Kinematik

Dalam hal kesamaan kinematika, rasio dari kecepatan dan percepatan yang digunakan dalam model harus dijaga. Rasio dari kecepatan pada prototipe dengan kecepatan model yang bersesuaian harus konstan. Hal ini berlaku pada seluruh kecepatan termasuk kecepatan partikel fluida, angin, towing, model pada arah tertentu. Sama seperti sebelumnya, rasio dari percepatan model harus sama dengan prototipe, tetapi dengan rasio yang berbeda dengan kecepatan.

Ketika percepatan dan kecepatan model sudah sama dengan prototipe, maka keduanya dapat dikatakan memiliki kesamaan kinematik.

- Kesamaan Hidrodinamik

Hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh rasio dari gaya. Ada beberapa hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik berdasarkan masalah interaksi struktur dengan fluida. Kesamaan dinamik antara model dan prototipe didapatkan dengan memenuhi hukum kesamaan tersebut. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut.

- Hukum Model Froude

Bilangan froude didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium. Bilangan froude didefinisikan dengan persamaan,

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.28)$$

Model froude harus memenuhi hubungan,

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.29)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah λ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel berikut merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude. Atas dasar Hukum Froude tersebut dengan faktor skala yang diasumsikan sebagai λ maka spesifikasi ukuran model dapat diperoleh dari prototipe yang sesungguhnya (Chakrabarti, 1994).

Tabel 2.1 Model to prototype multiple for the variables commonly used in mechanics under Froude scaling (Chakrabarti, 1994)

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>GEOMETRY</u>			
<i>Length</i>	<i>L</i>	λ	<i>Any Characteristic dimension of the object</i>
<i>Area</i>	L^2	λ^2	<i>Surface area or projected area on a plane</i>
<i>Volume</i>	L^3	λ^3	<i>For any portion of the object</i>
<i>Angle</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>e.g., between members or solid angle</i>
<i>Radius of Gyration</i>	<i>L</i>	λ	<i>Measured from a fixed point</i>
VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<i>Moment of Inertia Area</i>	L^4	λ^4	
<i>Moment of Inertia Mass</i>	ML^2	λ^5	<i>Taken about fixed point</i>
<i>Center of gravity</i>	<i>L</i>	λ	<i>Measured from a reference point</i>
<u>KINEMATICS & DYNAMICS</u>			
<i>Time</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Acceleration</i>	LT^{-2}	<i>1</i>	<i>Rate of change of velocity</i>
<i>Velocity</i>	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$	<i>Rate of change of displacement</i>
<i>Displacement</i>	<i>L</i>	λ	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	MT^{-2}	λ^2	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Coefficient</i>	MT^{-1}	$\lambda^{5/2}$	<i>Resistance (viscous) against oscillation</i>
<i>Damping Factor</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>Ration of damping and critical damping coefficient</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Period at which inertia force = restoring force</i>

Tabel 2.2 Model to prototype multiple for the variables commonly used in mechanics under Froude scaling (Lanjutan)
(Chakrabarti, 1994)

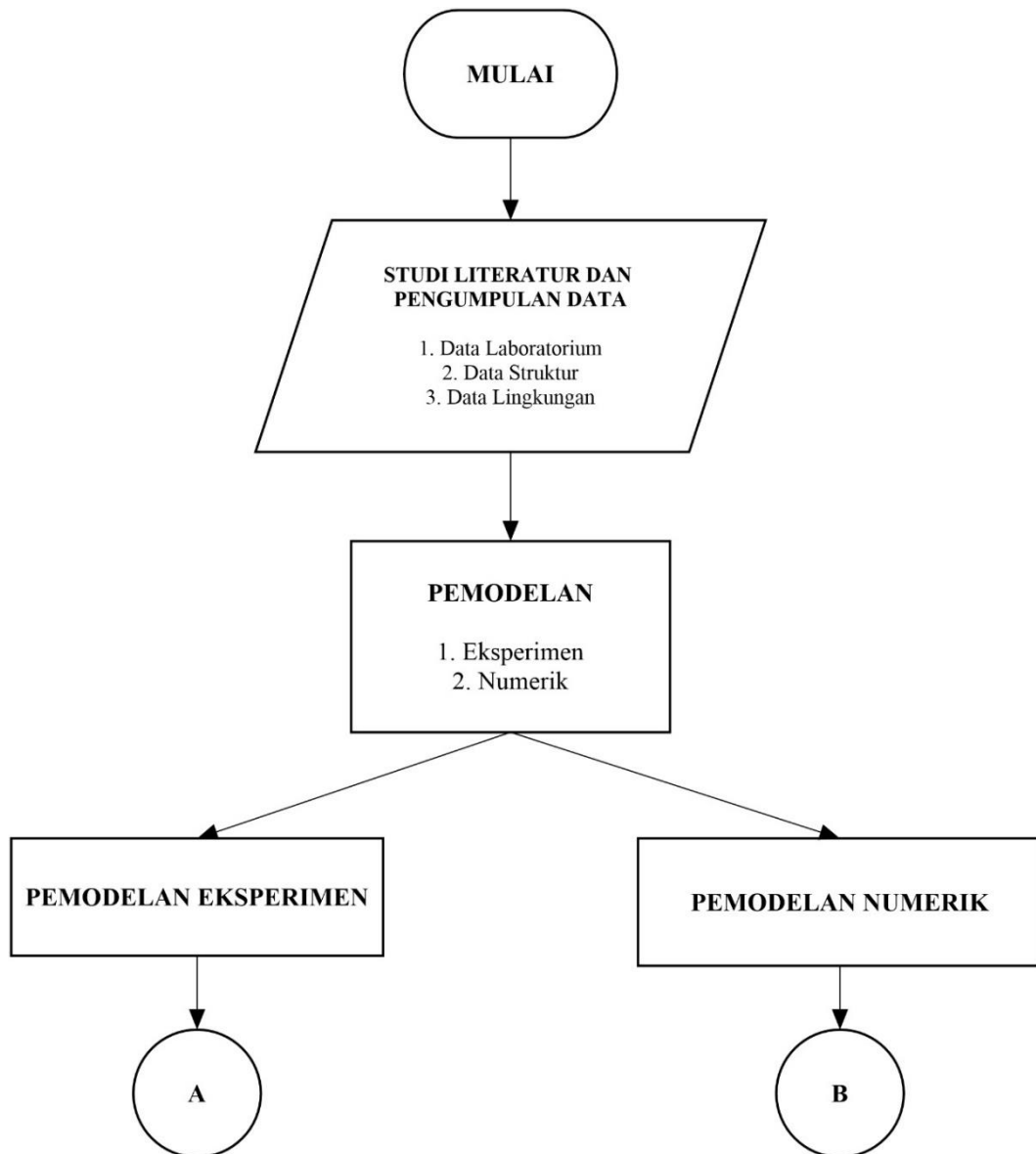
VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>WAVE MECHANICS</u>			
<i>Wave Height</i>	L	λ	<i>Consecutive crest to trough distance</i>
<i>Wave Period</i>	T	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	L	λ	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>
<i>Particle Velocity</i>	LT^{-1}	$\sqrt{\lambda}$	<i>Rate of change of movement of a water particle</i>
<i>Wave Elevation</i>	L	λ	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
<i>Particle Acceleration</i>	LT^{-2}	1	<i>Rate of change of velocity of a water particle</i>
<u>STABILITY</u>			
<i>Displacement (Volume)</i>	L^3	λ^3	<i>Volume of water moved by a submerged object (or part thereof)</i>
<i>Natural Period</i>	T	$\sqrt{\lambda}$	<i>Period of free oscillation in still water due to an initial disturbance</i>
<i>Metacenter</i>	L	λ	<i>Instantaneous center of rotation</i>
<i>Center of buoyancy</i>	L	λ	<i>Distance of C.G. of displaced volume from a fixed point</i>

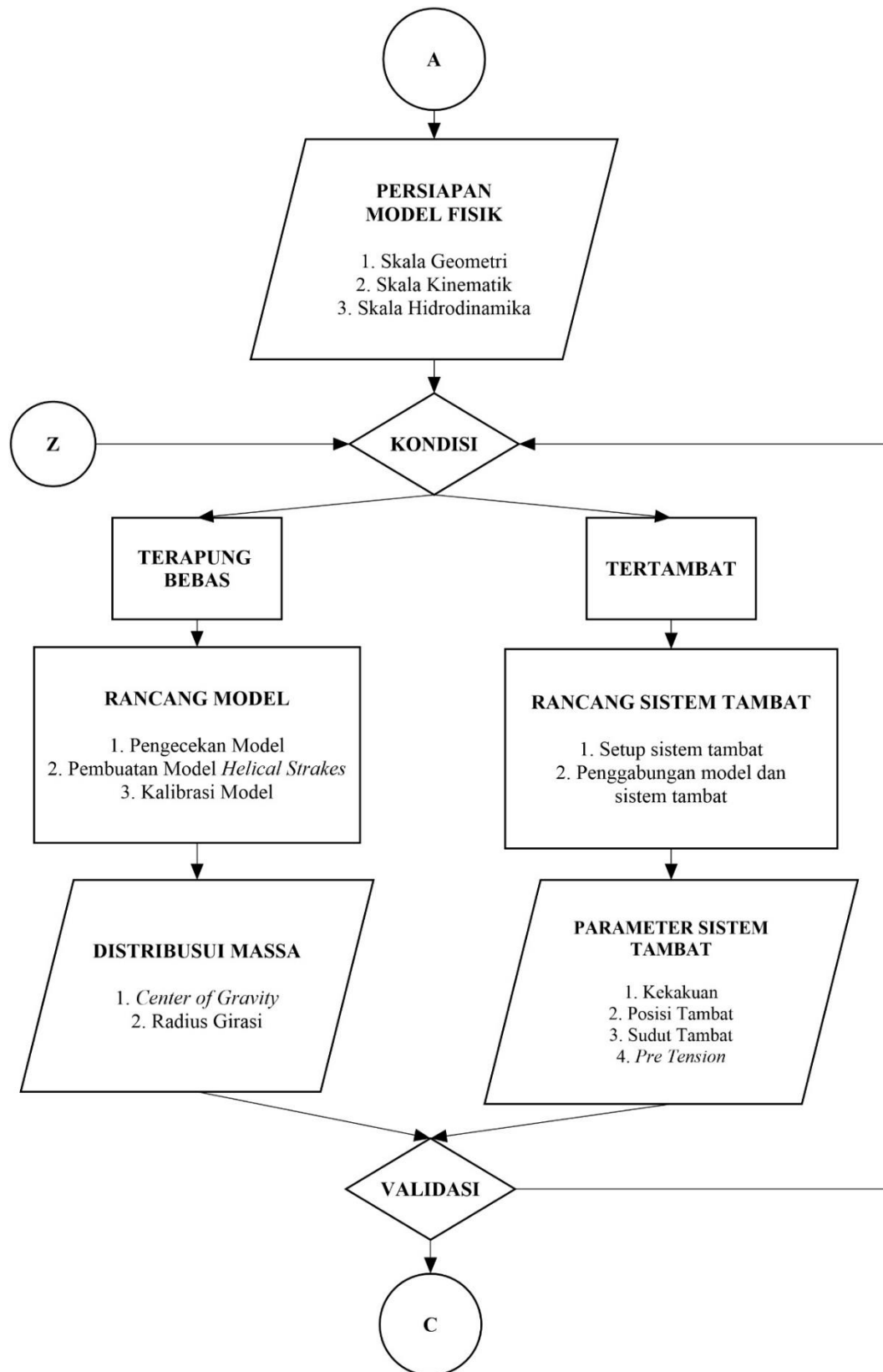
BAB III

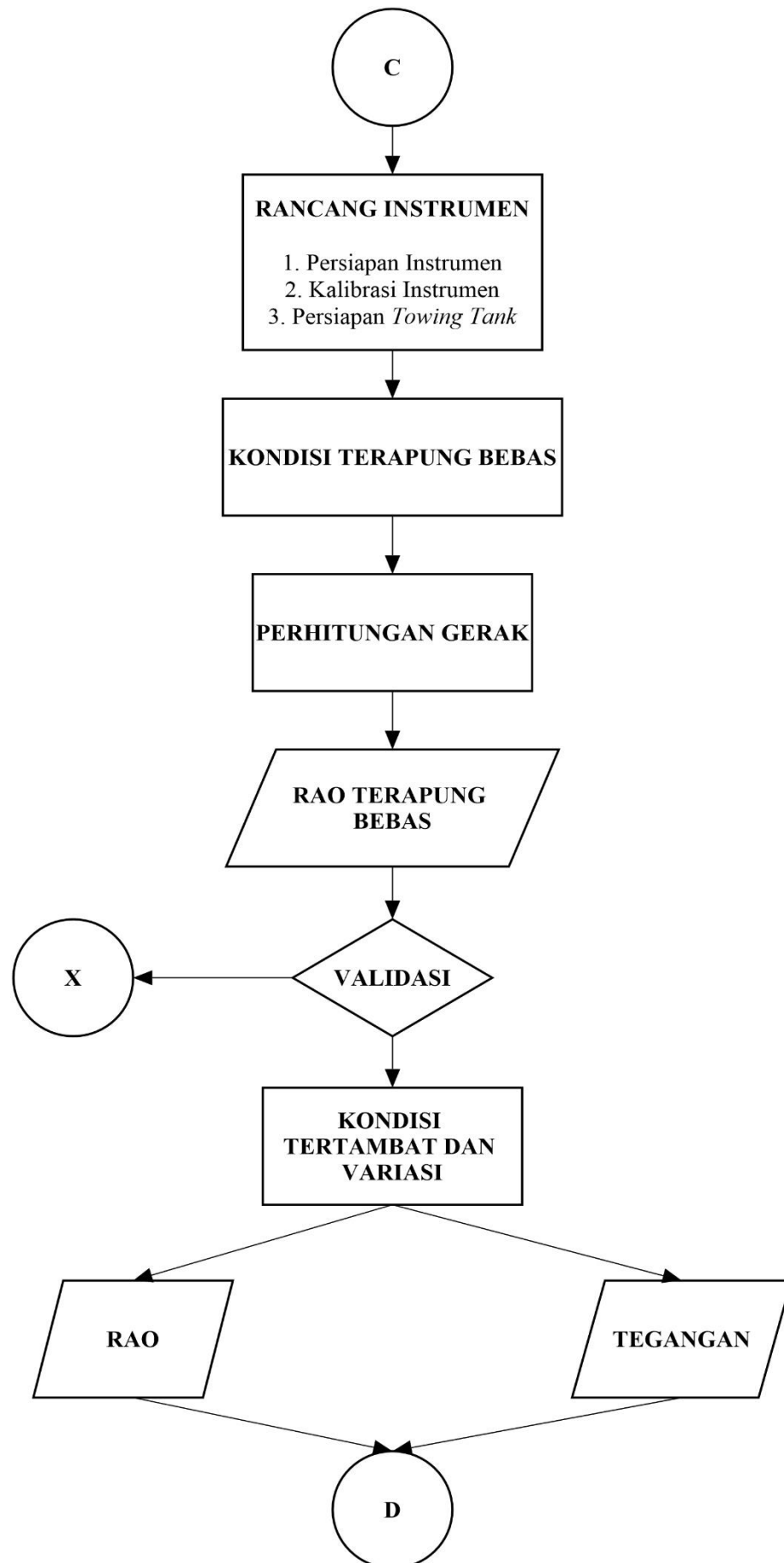
METODOLOGI PENELITIAN

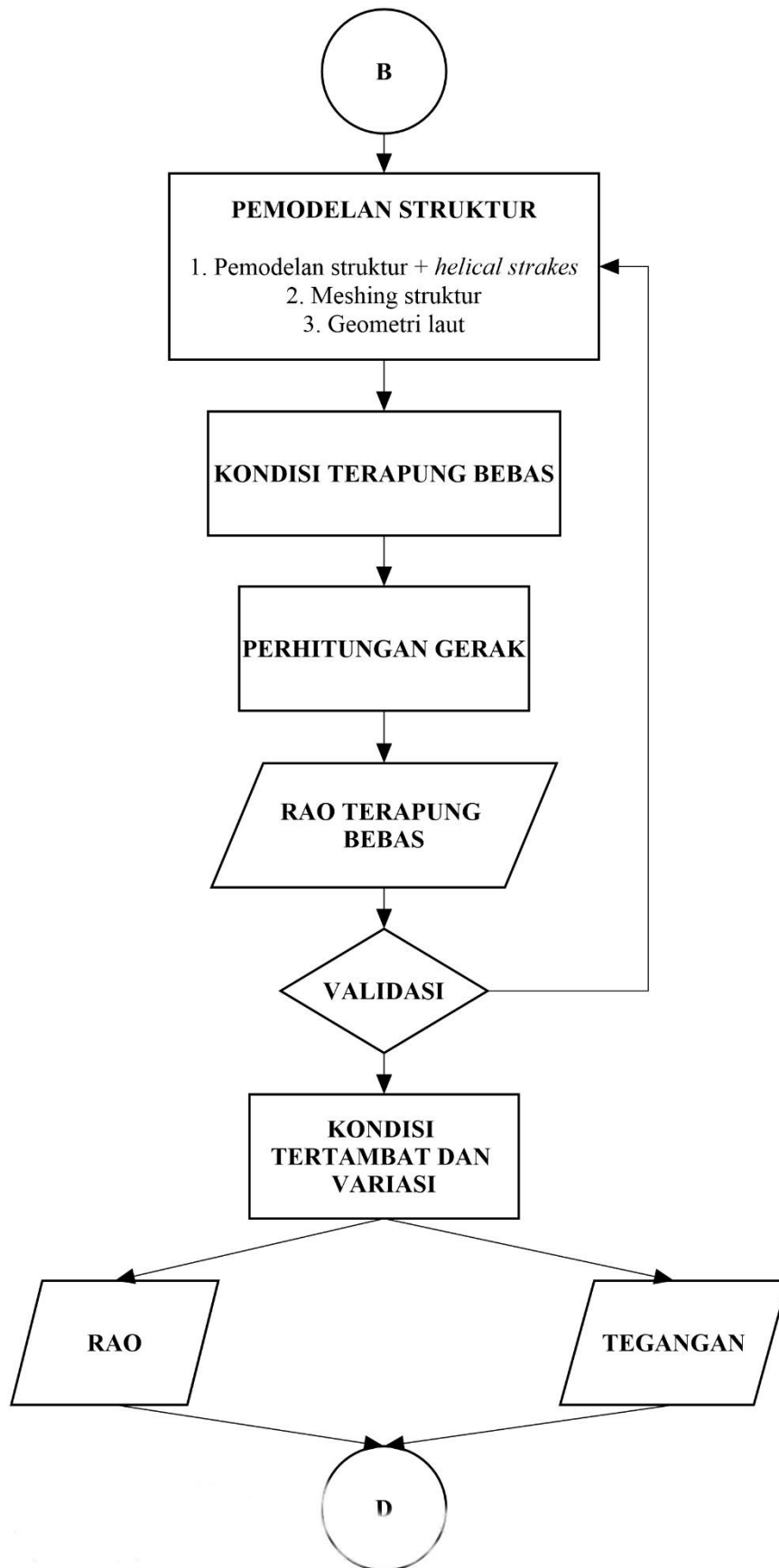
3.1 DIAGRAM ALIR

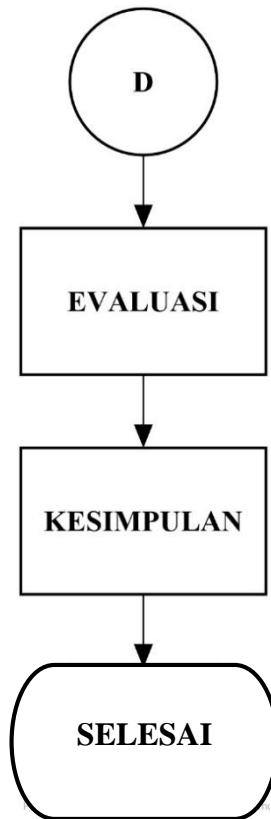
Alur pengerjaan tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.1 diagram alir pengerjaan berikut ini:











Gambar 3.1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir

3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR

a) Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Pada tahap awal dilakukan studi literatur dari berbagai literatur (jurnal, tugas akhir, dan buku). Literasi yang dipelajari merupakan literasi yang berhubungan dengan penyelesaian numeris dan eksperimen olah gerak dan sistem tambat SPAR yang memiliki *helical strakes*. Studi tersebut terkait tentang gelombang, interaksi gelombang dengan struktur, respon struktur akibat gelombang, sistem tambat dan interaksi sistem tambat dengan struktur. Pada tahap ini juga di mengumpulkan data struktur SPAR yang akan dimodelkan dan dianalisis. Pada tugas akhir kali ini menggunakan data Mini SPAR yang terdapat pada laporan *SPAR Model Test Joint Industry Project* (1995). Berikut adalah data yang berisi data tentang mini SPAR.

Tabel 3.1. Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc, 1995)

<u><i>Deck</i></u>		
<i>Height</i>	19.57	m
Panjang	50.29	m
Lebar	50.29	m
<u><i>Mass Distribution</i></u>		
<i>Weight</i>	26531.5	ton
<i>KG</i>	62.02	m

Tabel 3.2. Data *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Panjang	50	m
Lebar	3	m
Kedalaman (penuh)	2	m
Kedalaman (operasi)	1.8	m
Temperatur	27	°C
Jendela Observasi (<i>Toughned Glass</i>)	4	buah

Tabel 3.3. Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc, 1995)

<i>Description</i>	<i>Quantity</i>	<i>Unit</i>
<u><i>Hull</i></u>		
<i>Diameter</i>	16.00	m
<i>Length</i>	154.23	m
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m

Tabel 3.4. Data Lingkungan

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Kedalaman	225	m
Periode Gelombang	5-40	s

Tabel 3.5. Data *Helical Strakes*

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Diameter <i>helical strakes</i>	1,6	m
Banyak <i>helical strakes</i>	3	buah
Sudut <i>helical strakes</i> (Axis)	67.8	°

b) Pemodelan Numeris dan Eksperimen.

Setelah dilakukan studi literatur dan pengumpulan data dari dimensi SPAR, distribusi massa SPAR serta properti sistem tambat. Selanjutnya adalah pemodelan. Pemodelan dilakukan dengan dua cara pemodelan, yaitu dengan pemodelan numeris dan pemodelan eksperimental.

- **Pemodelan Numeris**

Pemodelan numeris dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) *SOLIDWORK* dan *ANSYSAQWA*. Perangkat lunak *SOLIDWORK* digunakan dalam memodelkan bentuk mini SPAR dengan dilengkapi *helical strakes*. Setelah dimodelkan pada *SOLIDWORK* dapat dihitung momen inersia dan jari-jari girasi mini SPAR yang telah ditambahkan *helical strakes*. Model dari *SOLIDWORK* kemudian di *import* ke perangkat lunak lainnya, yaitu *ANSYSAQWA* dan kemudian bentuk mini SPAR hanya bagian luarnya (*surface*) yang akan di lakukan meshing dan analisa dengan memasukan nilai diameter luar, posisi silinder dan jumlah jangkar dan *fairlead*. Data-data yang diperlukan pada *SOLIDWORK* dan *ANSYSAQWA* untuk melakukan analisa ini antara lain:

1. Dimensi SPAR (diameter dan tinggi SPAR).
2. Dimensi, bentuk dan jumlah *helical strakes*.
3. Kedalaman perairan.
4. Sarat (*draught*) SPAR.
5. Massa jenis air.
6. Parameter hidrostatis (Titik berat, radius girasi sumbu x, radius girasi sumbu y dan radius girasi sumbu z).
7. Arah gelombang.

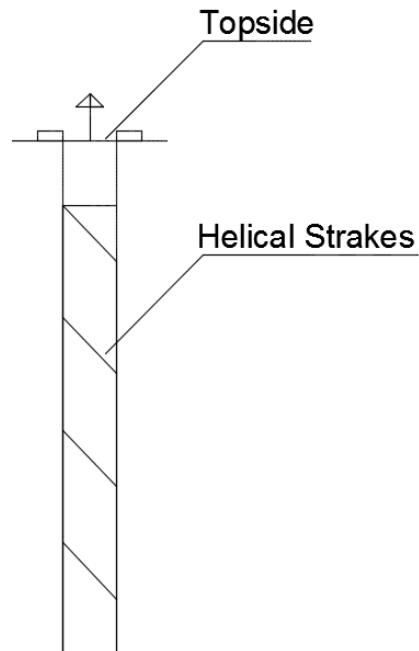
8. Periode gelombang.

9. *Properties mooring system*

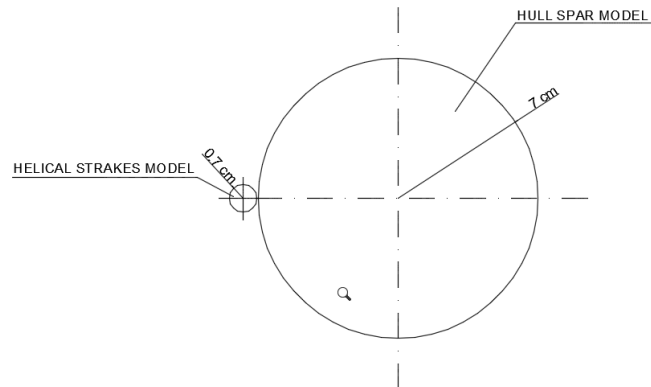
Pemodelan numerik dilakukan ketika SPAR dalam kondisi *free floating* dan menggunakan sistem tambat *taut* dan *catenary*.

- Pemodelan Eksperimen

Pemodelan eksperimen Mini SPAR diawali dengan penentuan skala dari ukuran asli ke ukuran model. Penskalaan ini mempertimbangkan aspek kesamaan geometris, kinematis dan dinamis dari sistem yang dimodelkan. Kapasitas kemampuan Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS juga menjadi pertimbangan skala yang dipakai. Selain itu, ketersediaan barang di pasaran untuk pembuatan model juga dipertimbangkan dalam penentuan nilai skala. Pada tahap kesamaan dinamis dari sistem digunakan kesamaan dalam nilai Froude sistem. Hal ini dilakukan karena pada tinjauan eksperimen kali ini hanya mempertimbangkan gaya gravitasi dan gaya inersia dari sistem. Perancangan model didapatkan pada gambar berikut :



Gambar 3.2. Permodelan model dengan *Helical Strakes* tampak samping



Gambar 3.3. Permodelan model dengan *Helical Strakes* tampak atas

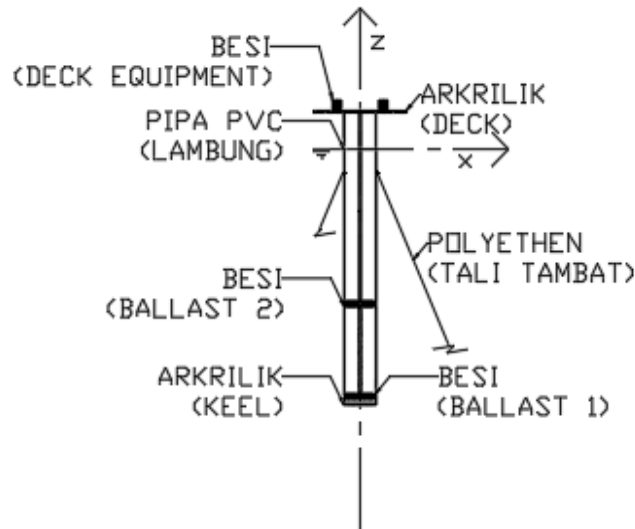
c) Validasi Model

Validasi model perlu dilakukan ketika melakukan pemodelan dalam metode numeris dan eksperimen. Perbedaan hasil pemodelan pada metode numeris dan eksperimen tidak boleh terlalu besar. Presentase perbedaan hasil pemodelan yang disyaratkan adalah sebesar 5%. Pada penelitian kali data yang harus di validasi adalah *displacement*, VCG, dan posisi *fairlead* karena hanya ketiga point tersebut yang menjadi parameter dasar. Keempat nilai tersebut dapat ditampilkan pada hasil analisa nimeris dengan ANSYSAQWA.

d) Rancang Model

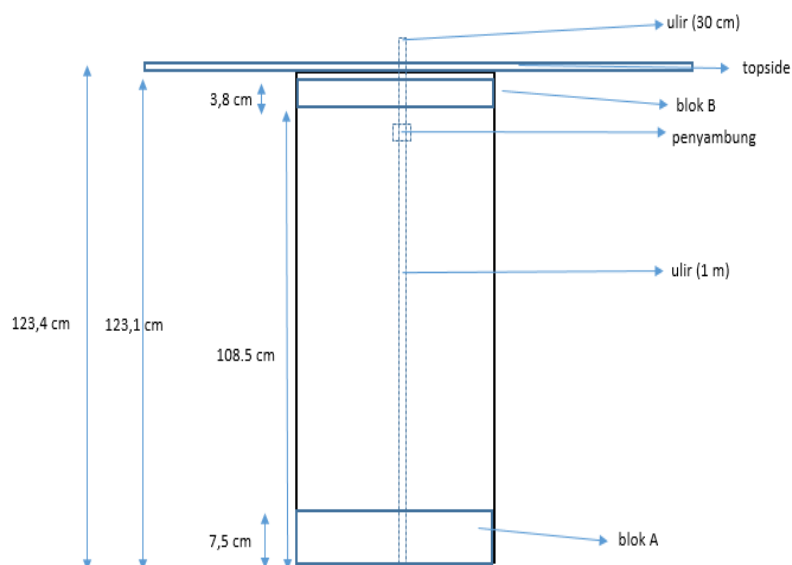
Dalam tahap ini model SPAR yang digunakan adalah model mini SPAR polos yang telah di buat oleh Ivandhito dkk pada tahun 2017. Model mini SPAR yang polos kemudian dimodivikasi dengan menambahkan *helical strakes* dengan selang yang meililiti sisi bagian luar dari mini SPAR. Model tersebut terdiri dari paralon, akrilik, besi pemberat (*ballasting*) dan besi ulir. Skala yang digunakan rancang model adalah dengan skala yang telah dibuat di langkah sebelumnya. Pegecekan model meliputi besar berat tersebut juga perlu didistribusi sedemikian hingga besar jari-jari girasi baru setelah penambahan *helical strakes* yang terskala terpenuhi. Agar beban tersebut dapat disebar dengan mudah, maka beban akan diletakkan di besi ulir sehingga beban dapat diatur posisinya sehingga jari-jari girasi dan KG

terpenuhi. Penambahan *helical strakes* berdasarkan rekomendasi dari Wilson dan Tinsley (1989) tentang dimensi dari *helical strakes* yang harusnya digunakan pada struktur silinder. Diameter *helical strakes* yang digunakan 0.1 dari diameter SPAR.



Gambar 3.4. Rencana Model SPAR

Selanjutnya untuk kompartemen digunakan besi berbentuk silinder pipih yang dijadikan sebagai *ballast* untuk mengatur titik berat dari model agar sesuai dengan skala yang telah ditentukan. Dalam pengaturan *ballast* digunakan sebuah silinder pejal yang berulir sehingga silinder pipih dapat diatur sesuai kebutuhan.



Gambar 3.5. Desain pemberat dan ulir

e) **Kalibrasi Model dan Instrumentasi**

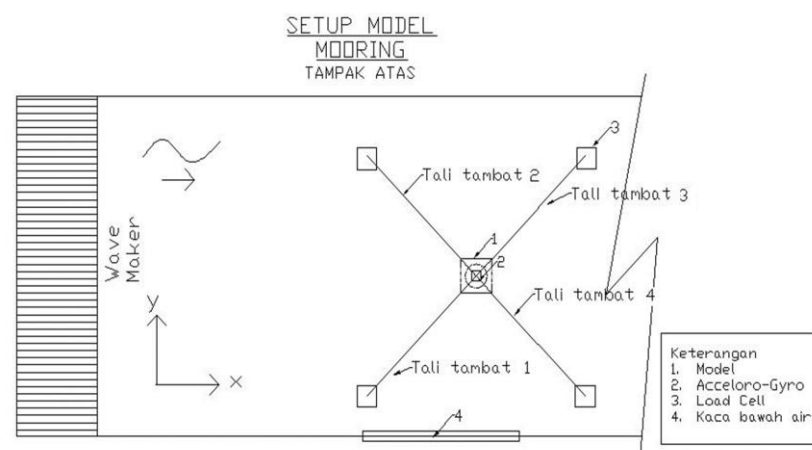
Kalibrasi model dilakukan untuk menyesuaikan model fisik yang dibuat sesuai dengan perencanaan. Kalibrasi model model dapat dinyatakan valid apabila model yang meliputi letak pusat massa (*centre of gravity*) dan jari-jari girasi struktur sudah terkalibrasi serta memiliki dimensi yang sama dengan struktur terskala. Sedangkan kalibrasi instrumen dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari nilai yang dihasilkan oleh instrumen yang digunakan sehingga data yang di hasilkan pada saat kalibrasi dan data yang dihasilkan dari proses eksperimen dapat dipertanggung jawabkan kebenarannya.

f) **Rancang Sistem Tambat**

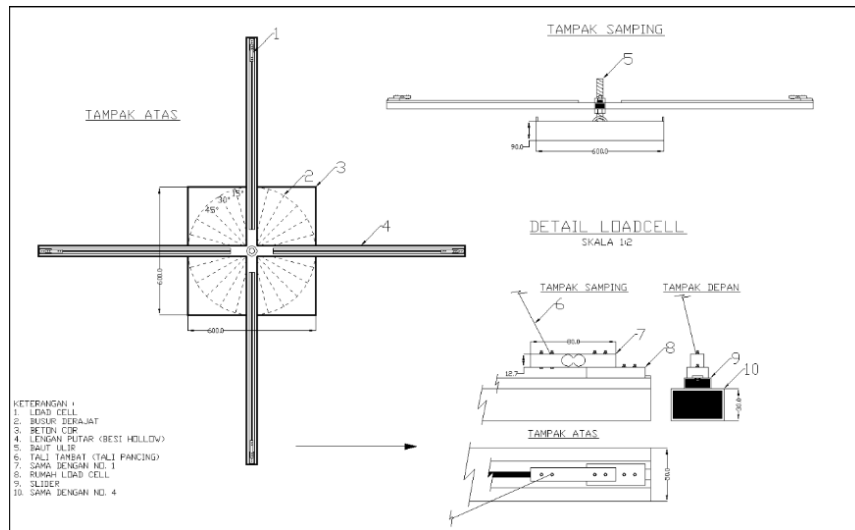
Pada tahap ini, dilakukan perancangan sistem tambat yang akan digunakan pada model SPAR sebelum dilakukan eksperimen di laboratorium hidrodinamika ITS. Gambar 3.6. menunjukkan *layout* dari sistem tambat.

- *Setup* sistem tambat

Sistem tambat yang digunakan pada model terdiri dari empat buah *mooring line* yang dihubungkan dengan menggunakan *fairlead*. *Mooring line* ditambatkan pada *load cell* yang berada di jangkar di dasar kolam Laboratorium Hidrodinamika ITS. Dalam mengukur gerakan model SPAR.



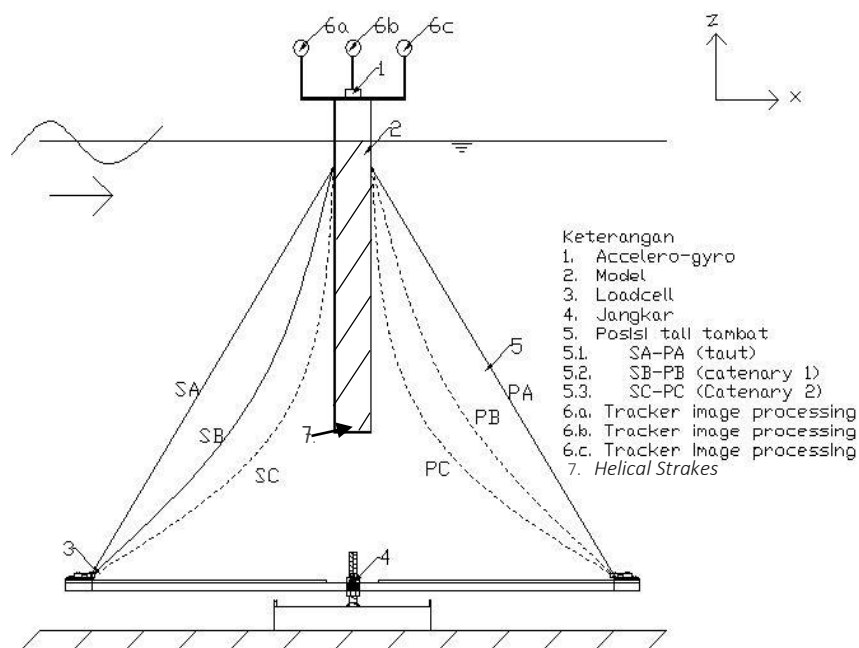
Gambar 3.6. Rencana sistem tambat yang digunakan pada pengujian model SPAR



Gambar 3.7. Jangkar dan Load Cell

- Penggabungan model dan sistem tambat

Berikut ini merupakan tahapan penggabungan model SPAR dan sistem tambat sebelum dilakukan tes di laboratorium Hidrodinamika ITS. Penggabungan model dengan sistem tambat dilakukan pada kolam uji dengan mengaitkan tali dari jangkar ke *fairlead* yang telah di rencanakan sesuai dengan skala dan konfigurasi tali disesuaikan dengan panjang tali yang akan digunakan.



Gambar 3.8. Model SPAR dengan sistem tambat

g) Parameter Sistem Tambat

Parameter sistem tambat yang digunakan adalah konfigurasi tali *taut* dan *catenary*. Pada tali tambat terdapat kekakuan yang dipengaruhi oleh *properties* dari material yang digunakan. Modulus elastisitas material mempengaruhi kekakuan tali tambat yang digunakan. Semakin besar kekakuannya, semakin besar pula frekuensi natural dari struktur. Konfigurasi tali pada awal pengujian model SPAR ini di *setting* dalam keadaan paling tegang (*taut*). Dari autocad, didapatkan panjang tali dalam kondisi tegang adalah 1,96 m. setelah itu pada keadaan kendor (*catenary*) menggunakan panjang tali 1,975 m dan 2 m. Data *properties* mooring line dari *prototype* Mini SPAR hasil penelitian JIP yang menjadi acuan model SPAR yang dibuat dapat dilihat di Tabel 3.6

Tabel 3.6. *Properties* tali tambat *prototype* SPAR

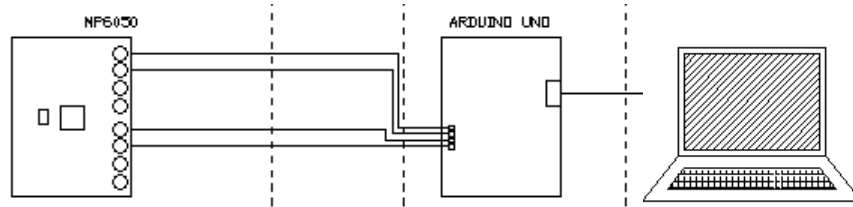
	Model	Mini SPAR	Satuan
Length Taut	1.96	245,5	m
Length Catenary 1	1,975	246,5	m
Length Catenary 2	2	250	m
Diameter	0.62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	0.604	1175000	KN

h) Instrumen Laboratorium

Instrumen Laboratorium yang digunakan dalam analisa model SPAR ini antara lain *Gyroscope* untuk mengukur gerakan *pitch* model, *Image Processing* untuk mengukur gerakan *heave* dan *surge* model, *Load Cell* untuk mengukur tegangan tali pada sistem tambat. Berikut merupakan penjelasan dari alat-alat pengukuran tersebut.

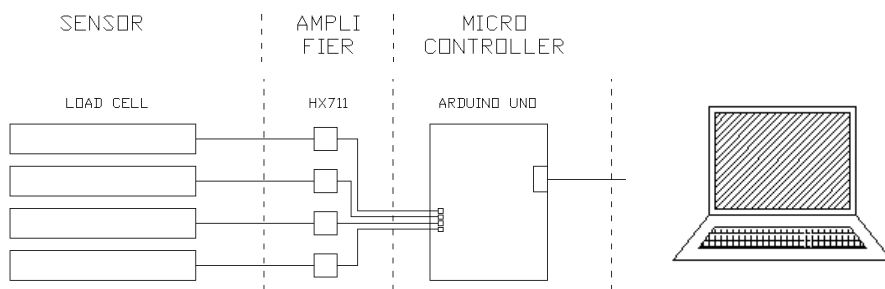
1. *Gyroscope* merupakan sensor *gyro* yang digunakan untuk menentukan orientasi gerak dengan prinsip ketetapan momentum sudut yang mendeteksi gerakan sesuai gravitasi. Instrumen *gyroskop* yang digunakan adalah *gyroskop* MPU 6050 GY87. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh microcontroller Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka angka digital yang dapat

mencatat gerakan yang terjadi pada arah gerakan rotasi sumbu y (*pitch*). Gambar 3.9 menjelaskan tentang pengukuran gerak menggunakan *Gyroscope*.



Gambar 3.9. Diagram Sistem *Accelerometer-gyro*

2. *Load Cell* digunakan untuk mengukur tegangan tali pada sistem tambat ketika eksperimen. Pada *Load Cell* terdapat sensor *strain gauge* yang mengukur tegangan yang terjadi pada tali tambat. Gambar 3.10 menjelaskan tentang pengukuran gerak menggunakan *Loadcell*



Gambar 3.10. Diagram Sistem *Load Cell* yang digunakan pada eksperimen

3. *Digital image processing* adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar dengan input dan output berupa gambar. Pada penelitian ini, *Digital image Processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk menganalisa gerakan translasi naik-turun (*heave*) dan maju-mundur (*surge*). Pada struktur dipasang tiga buah bola berwarna merah diatas *deck* yang digunakan untuk menganalisa gerak pada objek. Objek yang ditinjau adalah bola merah yang berada di titik pusat model sedangkan kedua bola merah lainnya diletakkan di ujung model yang digunakan untuk perhitungan skala pixel dan validasi data yang

dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270.



Gambar 3.11. Kamera dan benda yang ditracking

i) Metode Numeris

Pada tahap ini, dilakukan analisa RAO prototype model SPAR yang digunakan sebagai acuan model sesuai dengan data dari penelitian *Joint Industry Project* (JIP) dalam keadaan terapung bebas dan bertambat dengan analisa panel 3D Diffraction method menggunakan bantuan perangkat lunak ANSYSAQWA. Tahapan analisa untuk perhitungan numerik RAO dalam keadaan free floating adalah sebagai berikut :

- Prototype SPAR dari data penelitian JIP dimodelkan sesuai dengan dimensi yang ada dan di berikan 3 *helical strakes* menggunakan perangkat lunak SOLIDWORK dan kemudian model dari SOLIDWORK di buka melalui perangkat lunak ANSYSAQWA. Kemudian, model di bagi menjadi elemen-elemen kecil menggunakan metode difraksi dan dengan meshing tertentu.
- *Displacement* merupakan massa dari struktur ditambah dengan *added mass* struktur itu sendiri. Data yang diperlukan untuk mendapatkan besar dari *displacement* struktur itu sendiri adalah nilai dari *Center of Gravity* (COG) struktur, sarat (*draught*) struktur dan radius girasi struktur.
- Gaya kekakuan dipengaruhi oleh gerak *heave*, *pitch* dan *roll* pada kondisi *free floating*. Pada ANSYSAQWA untuk analisa gaya kekakuan ini disesuaikan dari sarat struktur (mempengaruhi volume dan *water plane area*) dan juga *center of gravity* struktur.

- Gaya gelombang, didapatkan dari input frekuensi/periode gelombang yang ditinjau dimana untuk periode gelombang di laut sendiri berkisar antara 5-40 detik.
- ANSYS AQWA nantinya akan memberikan keluaran hasil analisa berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan *free floating* untuk tiap gerakan translasi (*surge* dan *heave*) dan rotasi (*pitch*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang ditinjau.

Sedangkan, tahapan analisa untuk perhitungan numerik RAO dalam keadaan tertambat adalah sebagai berikut :

- Prinsip utama dari digunakannya *mooring system* pada suatu struktur sendiri adalah untuk menambahkan kekakuan pada sistem struktur tersebut sehingga dapat memperkecil gerakan *heave* yang terjadi.
- ANSYS AQWA nantinya akan memberikan keluaran hasil analisa berupa respon berupa domain waktu yang selanjutnya dilakukan *fast fourier transform* untuk mendapatkan nilai dari respon pada periode tertentu. setelah itu dirubah menjadi fungsi transfer gerakan atau *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan tertambat untuk tiap gerakan translasi (*surge* dan *heave*) dan rotasi (*pitch*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang atau periode gelombang tertentu.

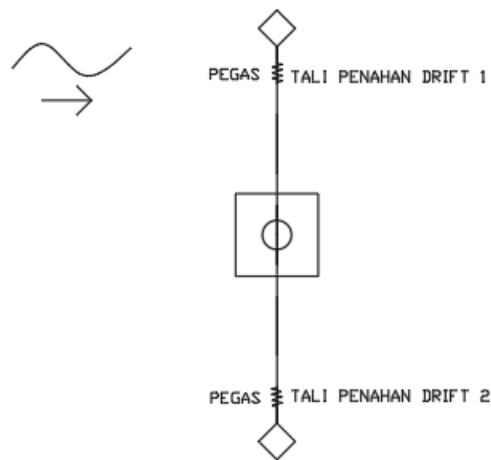
j) Metode Eksperimen

Eksperimen model dilakukan dalam 2 tahap yaitu uji model terapung bebas (*free floating*) dan model dengan tali tambat (*moored*) dengan variasi konfigurasi tali. Variasi konfigurasi tali dilakukan dengan menambahkan panjang tali pada *mooring line*. Berikut merupakan langkah yang dilakukan dalam perhitungan eksperimen :

- Eksperimen model terapung bebas (*free floating*)
 1. Persiapkan model yang telah dibuat dan alat uji yang digunakan.
 2. *Gyroscope* dipasang di *topside* model SPAR tegak lurus dengan titik berat model untuk mengukur gerakan *pitch*. Kamera di depan model

dipasang untuk tracking objek bola yang ada di *topside* untuk merekam gerak *surge* dan *heave* menggunakan *image processing*.

3. Persiapan eksperimen di *towing tank* ini perlu sekali diperhatikan untuk menjaga air selalu dalam keadaan tenang untuk mengurangi faktor-faktor yang tidak dibutuhkan agar perhitungan dapat dianggap valid.
4. Dalam kondisi *free floating* juga dipasang tali penahan drift (*loose rope*) agar model tidak bergeser terlalu jauh dari posisi awal yang dapat mengganggu proses perekaman data.



Gambar 3.12.. Konfigurasi tali penahan gerak *drifting*

5. Setelah semua dipastikan sesuai dengan syarat uji run gelombang maka eksperimen dapat dimulai. Jika belum sesuai, maka perlu dilakukan *setup* ulang.
6. Uji *run* gelombang dilakukan dalam beberapa variasi periode gelombang. Periode gelombang akan disesuaikan dengan hasil penyekalaan (antara 5-40s) dengan faktor skala yang digunakan. Dari hasil skala didapatkan periode gelombang yang digunakan adalah sebagai berikut :

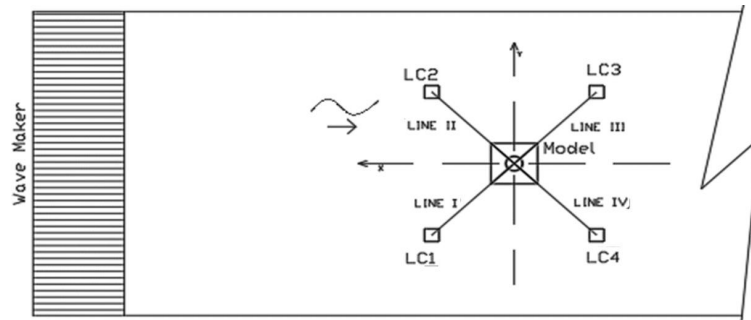
Tabel 3.7. Periode gelombang eksperimen

No	Periode Gelombang (s)
1	3,6 detik
2	2,6 detik
3	2,1 detik
4	1,7 detik
5	1,3 detik
6	1,1 detik
7	0,5 detik

7. Dari hasil pengukuran menggunakan image processing dan gyroscope didapatkan data gerakan model untuk tiap gerakan yang ditinjau yang kemudian diolah untuk menapat respon gerakanya.
8. Hasil pengukuran akan digambarkan dalam bentuk grafik Respons Amplitude Operator (RAO) gerak dari model SPAR untuk gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*.
- Eksperimen *model dengan tali tambat (mooring)*

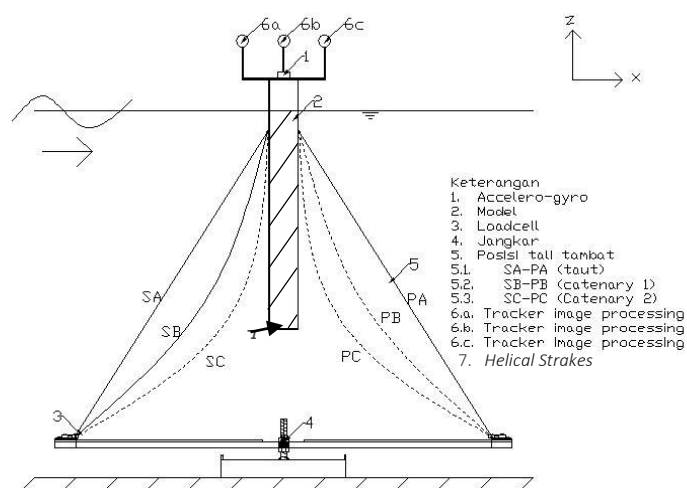
Eksperimen model dengan tali tambat ini memiliki langkah yang hampir sama dengan tanpa tali tambat. Dalam kondisi tertambat tegangan tali juga diperhitungkan dengan menambah instrumen *load cell*.

 1. Jangkar diletakkan di dasar kolam untuk mengikat tali tambat agar mendekati kondisi asli di lepas pantai yang diikatkan di dasar laut. Jangkar dilengkapi dengan *load cell* untuk mengukur tegangan tali.
 2. Pengaturan posisi jangkar dengan menggerakkan load cell mendekati atau menjauhi model struktur.
 3. Pengaturan konfigurasi tali dilakukan dengan menarik tali sehingga sesuai konfigurasi tali (*taut* atau *catenary*) yang dikehendaki.
 4. Dilakukan evaluasi apakah *setup* model sudah sesuai dengan rencana atau belum. Jika belum sesuai dengan rencana penelitian maka perlu dilakukan *setup* kembali. Jika sudah sesuai dengan rencana, maka eksperimen dapat dimulai.



Gambar 3.13. Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat

5. Selama eksperimen output dari *load cell*, *Image Processing* dan *Girooskop* akan diamati untuk perhitungan gerak struktur dan tegangan tali
6. Eksperimen ini dilakukan dengan variasi konfigurasi tali sebagai berikut :
 - Konfigurasi tali dari *mooring line* di variasikan dari keadaan *tegang* (taut), *catenary 1* dan *catenary 2*. Variasi ini dilakukan dengan menambah panjang tali dari *mooring line* dengan tidak merubah posisi dari *load cell* yang digunakan untuk menghubungkan *mooring line* di dasar dan juga untuk mencatat tegangan tali maksimum yang terjadi. Uji *run* gelombang dilakukan pada setiap variasi konfigurasi tali yang direncanakan.



Gambar 3.14. Setup model dengan variasi konfigurasi tali
(*taut*, *catenary 1* dan *catenary 2*)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 PEMODELAN STRUKTUR

4.1.1 Pemodelan Numeris

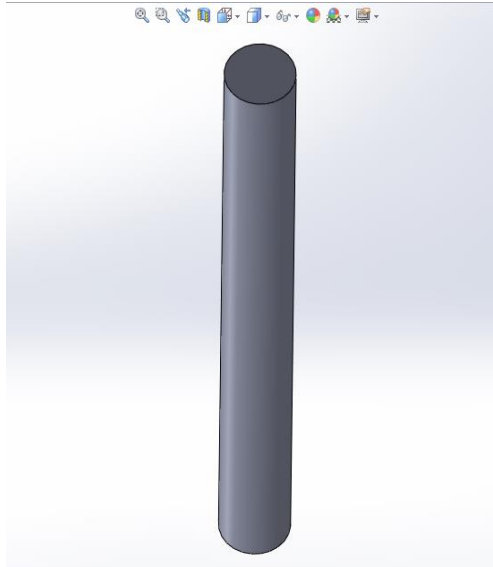
Pemodelan numeris dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *SOLIDWORK* dan *ANSYS AQWA*. Pemodelan numerik disesuaikan dengan dimensi dari SPAR yang diambil dari data Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995) dengan tambahan struktur berupa *helical strakes*. Pada tabel 4.1 merupakan dimensi Mini SPAR *Joint Industry Project* yang digunakan dalam pemodelan numeris.

Tabel 4.1 Data Dimensi Struktur Mini SPAR (Joint Industry Project, 1995)

Deskripsi	Besaran
<u>Diameter</u>	
Diameter (m)	16.00
Draft (m)	135.03
Tinggi (m)	154.23
Kedalaman Posisi Fairlead (m)	12,74
<u>Deck</u>	
Panjang (m)	50.29
Lebar (m)	50.2
<u>Helical</u>	
Diameter helical strakes (m)	1,6
Banyak helical strakes	3
Sudut helical strakes (°)	67.08

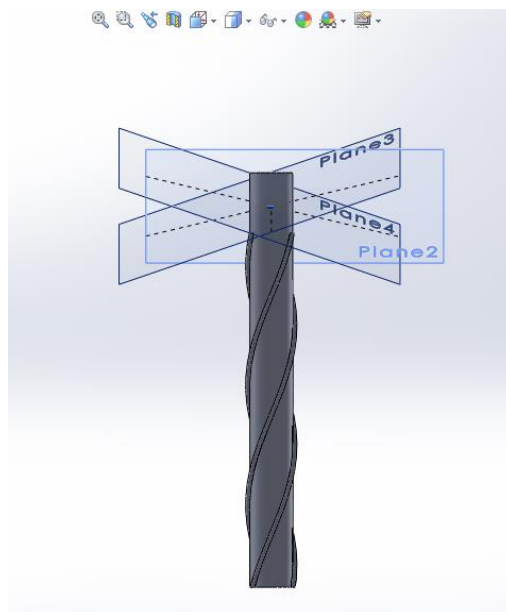
4.1.1.1 Pemodelan Menggunakan SOLIDWORK

Data diatas selanjutnya sebagai input awal untuk memodelkan SPAR *helical strakes* kedalam software *SOLIDWORK*. Pada pemodelan pada perangkat lunak *SOLIDWORK*, pertama membuat slinder dengan data diatas, kemudian dikombinasikan dengan *helix* dengan ukuran yang sesuai dengan data untuk membuat model SPAR dengan *helical strakes*. Visualisai pemodelan ditampilkan pada gambar berikut:



Gambar 4.1 Pemodelan Slinder menggunakan perangkat lunak

SOLIDWORK



Gambar 4.2 Pemodelan SPAR dengan *helical strakes* menggunakan perangkat lunak SOLIDWORK

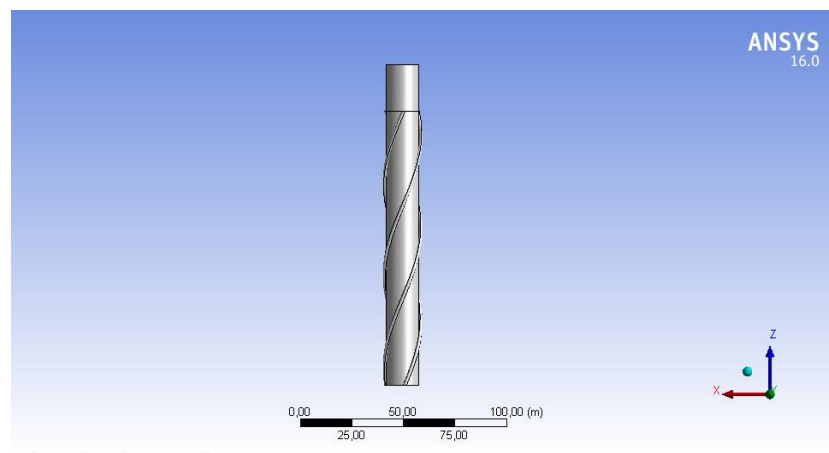
4.1.1.2 Pemodelan Menggunakan ANSYSAQWA

Pemodelan menggunakan perangkat lunak ANSYSAQWA memerlukan *import* data model dari perangkat lunak sebelumnya, yaitu SOLIDWORK. Pemodelan dalam ANSYSAQWA (*hydrodynamics*

diffraction dan *hydrodynamics response*) untuk mendapatkan respon gerak dan dinamika tegangan tali tambat SPAR dengan *helical strakes*. Dengan mengatur syarat batas dan melakukan *meshing* pada struktur.

Tabel 4.2 Data Syarat batas pemodelan di ANSYSAQWA

Deskripsi	Besaran
x (m)	1000
y (m)	1000
z (m)	225

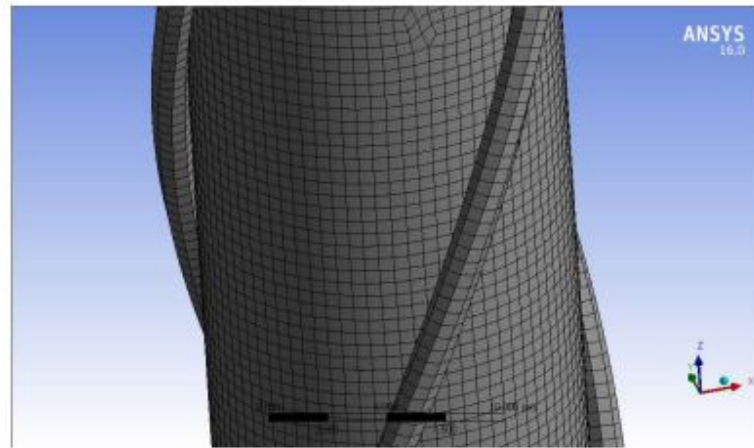


Gambar 4.3 Pemodelan SPAR dengan ANSYSAQWA

Pemodelan numerik dengan menggunakan perangkat lunak ANSYSAQWA memerlukan input data berupa sarat dan jari-jari girasi. Data yang dimasukkan pada ANSYS AQWA sesuai dengan tabel 4.3

Tabel 4.3 Data distribusi massa mini SPAR (*Joint Industry Project, 1995*)

Deskripsi	Besaran
Massa Total (ton)	26531.52
Keel to Gravity (m)	62.02
Radius Girasi YY (m)	61,47
Radius Girasi XX (m)	61,47



Gambar 4.4 Tampak detail model numeris dengan *meshing*

Pemodelan numeris yang selanjutnya adalah pemodelan struktur SPAR yang dilengkapi dengan *helical strakes*. sistem tali tambat dimodelkan dengan *cable* yang terhubung dengan *fairlead* yang berada di struktur dan terhubung secara *fix* pada *seabed* (dasar laut).

4.1.2 Pemodelan Eksperimen

Dalam melakukan studi eksperimen, SPAR dimodelkan menggunakan skala 1:125. Proses penskalaan yang dilakukan mengikuti aturan Froude yang hasilnya sesuai dengan tabel 4.4

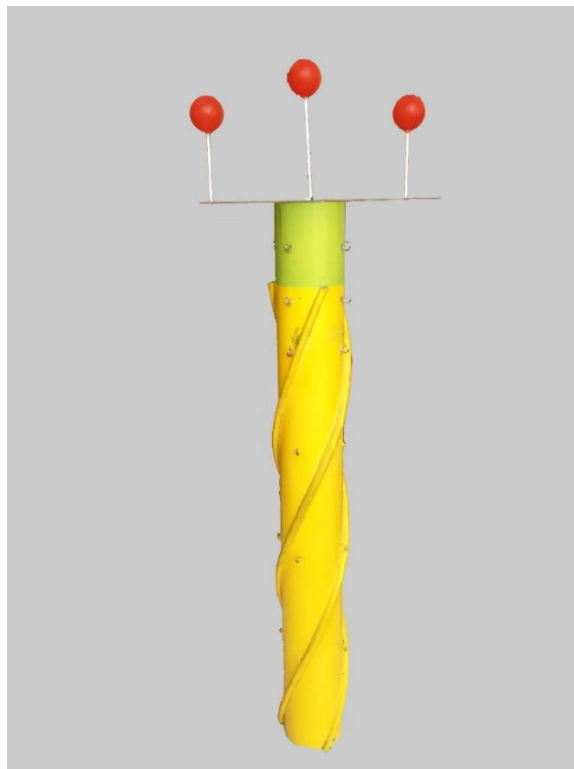
Tabel 4.4 Hasil penskalaan model SPAR

Deskripsi	Prototype	Faktor skala	Model
Massa (kg)	26531524.910	λ^3	13.584
Diameter (m)	16.000	λ	0.128
Sarat (m)	135.010	λ	1.080
Panjang (m)	154.210	λ	1.234
Keel to Gravity (m)	62.022	λ	0.496
Radius Girasi YY (m)	61.470	λ	0.492
Radius Girasi XX (m)	61.470	λ	0.492
Periode gelombang (s)	40, 29, 23.5, 19, 14.5, 12.3, 5.5	$\lambda^{1/2}$	3.6, 2.6, 2.1, 1.7, 1.3, 1.1, 0.5

Model SPAR eksperimen menggunakan pipa PVC 5” sebagai lambung SPAR yang telah disesuaikan dengan diameter model. Selanjutnya pipa dipotong sesuai dengan ukuran dan bagian bawah pipa ditutup dengan akrilik yang di tempelkan dan di dempul agar tidak bocor. Didalam pipa diberi besi ulir dan lempengan besi slinder untuk mengatur distribusi massa. Sehingga distribusi masa dari struktur terpenuhi. Penambahan *helical strakes* dilakukan pada lambung luar pipa PVC dengan bahan selang.



Gambar 4.5 Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik



Gambar 4.6 Tampak depan model fisik

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan distribusi massa model SPAR yang sesuai dengan hasil penskalan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung massa total

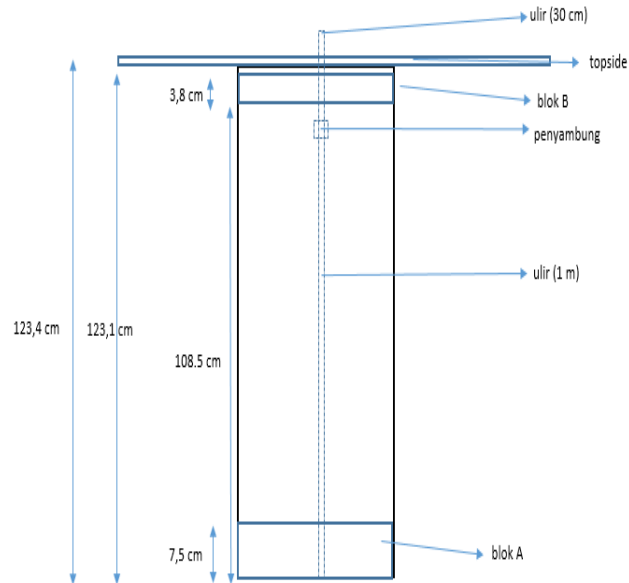
Massa total model didapatkan dari penjumlahan hasil penimbangan yang dilakukan pada tiap-tiap material. Hasil dari penimbangan di tampilkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil penimbangan berat material

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.49
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.09
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.09
	Ballast 4	1	663.59	1	663.59
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1	2096.69
	Ballast 2	0.8	465.99	1	465.99
	Ballast 3	0.5	179.49	1	179.49
Topside		0.3	599.50	1	599.50
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.09	1	352.09
	Pipa	-	4087.53	1	4087.53
	Penyambung	-		1	0.00
	Helical Strakes		96.64	3	289.91
	Mur	-		2	0.00
Total					14127.93

2. Distribusi beban untuk perhitungan jari-jari girasi

Jari-jari girasi dihitung dari momen inersia massa dari tiap-tiap material dan kemudian digabungkan untuk mendapatkan momen inersia massa model dan dapat di hitung jari-jari girasi model. Gambar 4.7 menampilkan desain dari model secara detail. Perhitungan momen inersia model berdasarkan desain dari Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Desain Pemberat dan Ulir

Perhitungan berat dan momen inersia model dari setiap blok sebagai berikut:

a. Pipa PVC (Silinder Berongga)

Perhitungan momen inersia massa dari silinder berongga dapat menggunakan persamaan 4.1 dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan roll, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, r merupakan radius silinder dan l merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (6r^2 + l^2) \quad (4.1)$$

Tabel 4.6 Perhitungan momen inersia massa PVC

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
PVC	4087.53	5287070.00	5287070.00

b. Blok A (Lingkaran Pejal)

Perhitungan momen inersia massa dari silinder pejal dapat menggunakan persamaan 4.2

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (3r^2 + l^2) \quad (4.2)$$

Hasil perhitungan material-material di blok A adalah sebagai berikut:

Tabel 4.7 Perhitungan momen inersia massa Blok A

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 1</i>	1628.49	16446.05	16446.05
<i>Ballast 2</i>	1623.09	16391.52	16391.52
<i>Ballast 3</i>	2094.09	20624.60	20624.60
<i>Ballast 4</i>	663.59	6825.99	6825.99
<i>Cap</i>	47.46	471.32	471.32

c. Blok B (Lingkaran Pejal)

Persamaan untuk menghitung momen inersia yang digunakan sama dengan perhitungan blok A (Persamaan 4.2). Hasil perhitungan material-material di blok B adalah sebagai berikut:

Tabel 4.8 Perhitungan momen inersia massa Blok B

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 5</i>	2096.7	20748.49	20748.49
<i>Ballast 6</i>	465.99	4556.90	4556.90
<i>Ballast 7</i>	179.49	1756.57	1756.57

d. Topside

Perhitungan momen inersia *topside* yang berbentuk balok dapat menggunakan Persamaan 4.3 dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan *roll*, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, p merupakan panjang balok, l merupakan lebar balok dan t merupakan tebal balok.

$$I_{ox} = \frac{1}{12} m (l^2 + t^2) \quad (4.3a)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{12} m (p^2 + t^2) \quad (4.3b)$$

Tabel 4.9 merupakan hasil perhitungan momen inersia massa *topside*.

Tabel 4.9 Perhitungan momen inersia *topside*

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Geladak	599.5	79937.8	79937.8

e. Ulir

Ulir berbentuk silinder pejal sehingga untuk menghitung momen inersia massanya dapat menggunakan Persamaan 4.2. Hasil perhitungan momen inersia dari ulir adalah sebagai berikut:

Tabel 4.10 Perhitungan momen inersia massa ulir

Komponen	Berat (g)	$I_{ox} \text{ (g.cm}^2\text{)}$	$I_{oy} \text{ (g.cm}^2\text{)}$
Ulir	352.09	495873.99	495873.99

f. *Helical Strakes*

Helical strakes berbentuk silinder pejal sehingga momen inersia dari *helical strakes* adalah :

Tabel 4.11 Perhitungan momen inersia massa *helical strakes*

Komponen	Berat (g)	$I_{ox} \text{ (g.cm}^2\text{)}$	$I_{oy} \text{ (g.cm}^2\text{)}$
<i>Helical Strakes</i>	352.09	101469.24	101469.24

Setelah momen inersia massa dari setiap material diketahui, selanjutnya adalah perhitungan momen inersia massa total terhadap pusat massa model. Langkah pertama untuk mencari momen inersia total tersebut adalah dengan mencari pusat masa dari model terlebih dahulu.

Tabel 4.13 merupakan hasil perhitungan pusat masa model.

Tabel 4.12 Posisi pusat massa dari setiap material

		Berat (g)	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
Blok A	<i>Cap</i>	47.46	0.00	0.00	0.15
	Ballast 1	1628.5	0.00	0.00	6.50
	Ballast 2	1623.1	0.00	0.00	4.50
	Ballast 3	2094.1	0.00	0.00	3.0
	Ballast 4	663.59	0.00	0.00	1.25
Blok B	Ballast 5	2096.7	0.00	0.00	109.75
	Ballast 6	465.99	0.00	0.00	111.40
	Ballast 7	179.49	0.00	0.00	112.05

		Berat (g)	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
Tambahan	Topside	599.50	0.00	0.00	123.55
	Ulir	352.09	0.00	0.00	65.30
	Helical 1	96.64	7.75	0	54
	Helical 2	96.64	4.25	6.81	54
	Helical 3	96.64	4.25	6.81	54
PVC	PVC	4087.5	0.00	0.00	61.70
	Total	14127.93			

Tabel 4.13 Pusat massa model

LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
0.00	0.00	49.11

Jari-jari girasi dapat dicari dengan menggunakan persamaan 4.4.

Tabel 4.14 menampilkan hasil perhitungan jari-jari girasi dari model.

$$Jari - jari\ girasi = \sqrt{\frac{Inersia\ massa\ total\ gerak\ yang\ ditinjau}{massa\ total\ model}} \quad (4.4)$$

Tabel 4.14 Jari-jari girasi model

Rxx (cm)	Ryy(cm)
48.21	48.21

Validasi dilakukan agar desain model tidak jauh hasilnya dengan hasil penskalaan. Validasi ditampilkan pada tabel 4.15.

Tabel 4.15 Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan nilai target
hasil perhitungan

Deskripsi	Model Skala		Hasil Perhitungan		Error (%)
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan	
Massa Total	13.58	kg	14.127	kg	2 %
<i>Keel to Gravity (KG)</i>	49.6	cm	49.11	cm	1%
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	49,2	cm	48.21	cm	1,97%
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	49,2	cm	48.21	cm	1,97%

4.2 PEMODELAN TALI TAMBAT

Pemodelan tali tambat pada penelitian ini mengacu pada katalog dari Balmoral Marine (2010) yang berisi properties *mooring equipment* seperti jangkar, rantai, *wire rope* dan lain-lain. Pada penelitian ini tali tambat yang digunakan adalah tali *wire rope* yang memiliki properti dalam Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Properti *mooring line*

Diameter	115	mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBF	11760	kN
Kekakuan	1175	MN

Tali tambat yang sudah ditentukan kemudian diskala menjadi dimensi eksperimen. Bahan yang digunakan di sini adalah senar pancing yang menggunakan bahan nylon 6 dengan spesifikasi kekakuan yang di lampirkan. Properties tali pancing adalah sebagai berikut:

Tabel 4.17 Spesifikasi tali tambat eksperimen

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	20000000000	N/m ²
Diameter tali	D	0.62	mm
Luas Tali	A	0.3019	mm ²
Panjang Tali	L	1.96	m



Gambar 4.8 Bahan tali tambat

Penskalaan dilakukan kembali pada senar pancing untuk mendapatkan spesifikasi tali tambat yang digunakan, maka dari hasil skala didapatkan properties tali tambat adalah sebagai berikut:

Tabel 4.18 Spesifikasi tali tambat model fisik

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	250000000000	N/m ²
Diameter tali	D	77.50	mm
Luas Tali	A	4717.30	mm ²
Panjang Tali	L	245,5	m

Kekakuan tali tambat model hasil penskalaan dapat dihitung dengan Persamaan 4.5.

$$K = E \times A \quad (4.5)$$

$$K = 250,000 \text{ MN/m}^2 \times 0.00472 \text{ m}^2$$

$$K = 1,179.32 \text{ MN}$$

Validasi dilakukan dengan membandingkan kekakuan *wire rope* yang ada pada katalog Balmoral Marine (2010) dengan senar. Hasil perbandingannya adalah sebagai berikut:

Tabel 4.19 Perbandingan kekakuan *prototype* dengan *wire rope* acuan

<i>Stiffness model asli</i> (MN)	<i>Stiffness wire rope acuan</i> (MN)	Error (%)
1179,32	1175	0,37

4.3 VALIDASI MODEL

4.3.1 Validasi Model Numeris

Model yang dibuat di ANSYS AQWA dapat dilihat parameter hidrostatisnya dan distribusi massanya. Parameter ini yang akan digunakan untuk memvalidasi model fisik, sehingga bisa dilakukan analisa. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %.

Tabel 4.20 Perbandingan dan validasi model numerik dengan data

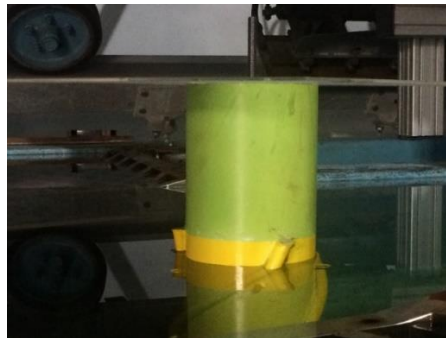
	Prototype		Model Numerik		Error (%)
Diameter	16.00	m	16.00	m	0.00
Draft	135.03	m	131.78	m	2.40
Length	154.23	m	154.23	m	0.00
Fairlead depth	12.74	m	12.74	m	0.00
Weight	26531524.91	kg	26837614.91	kg	1.154
KG	62.03	m	62.03	m	0.00
Roll Gyasi	61.48	m	59.26	m	3.61
Pitch Gyasi	61.48	m	59.26	m	3.61
Mooring Diameter	115	mm	115	mm	0.00
Mooring Stiffness (EA)	1175	MN	1175	MN	0.00

4.3.2 Validasi Model Eksperimen

Model fisik yang sudah dibuat dilakukan validasi, untuk mengetahui model tersebut sudah sesuai dengan penskalaan. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Hal yang perlu untuk di validasi adalah:

1. Massa Total

Massa total dapat dihitung dengan meninjau sarat (*draft*) model ketika kondisi terapung. Berat model dapat dihitung sebagai perkalian antara volume tercelup dan massa jenis air, sehingga didapat *displacement* model sebesar 14 kg.

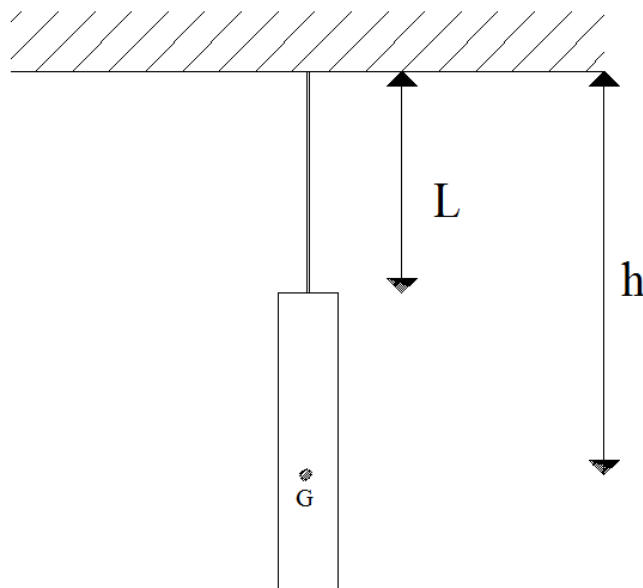


Gambar 4.9 Pengamatan *draft* atau sarat model SPAR

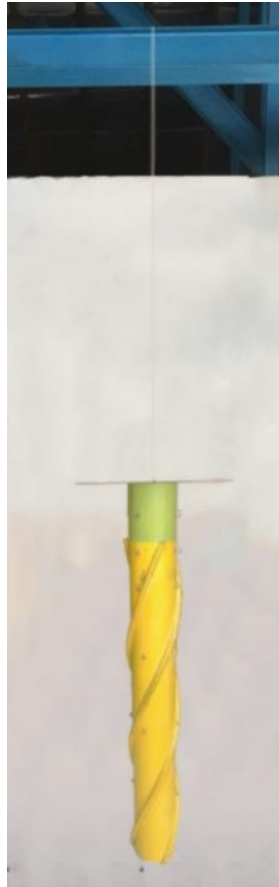
2. Jarak KG dan Jari-jari Girasi

Jarak KG dan jari-jari girasi pada struktur dihitung dengan melakukan tes pendulum pada struktur. Tes pendulum merupakan tes mengayunkan model dan menghitung periode dari ayunan struktur. Tes dilakukan dengan dua kondisi, kondisi 1 merupakan kondisi model tanpa massa tambahan, sedangkan kondisi 2 merupakan kondisi model dan pemberat pada jarak tertentu.

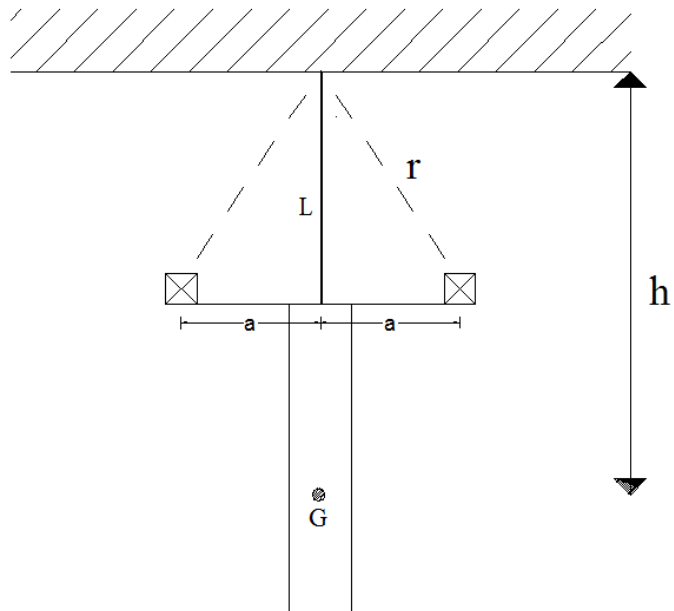
Pemberat yang dipakai merupakan plastisin yang telah dihitung beratnya di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Kelautan. Pada setiap kondisi dicatat periode ayunannya. Periode yang didapat kemudian digunakan untuk mencari KG dan jari-jari girasi. Skenario tes pendulum untuk kondisi 1 dan kondisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.12. Ukuran-ukuran yang dipakai untuk tes pendulum terdapat pada Tabel 4.21 berikut ini.



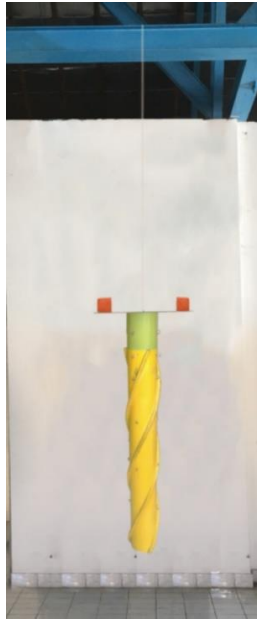
Gambar 4.10 Skenario tes pendulum kondisi 1 perhitungan jari-jari girasi



Gambar 4.11 Tes pendulum kondisi 1



Gambar 4.12 Skenario tes pendulum kondisi 2 perhitungan jari-jari girasi



Gambar 4.13 Tes pendulum kondisi 2

Tabel 4.21 Ukuran-ukuran yang digunakan pada pendulum test

1.	Berat Model (m)	14	kg
2.	Percepatan gravitasi (g)	9.81	m/s^2
3.	Jarak massa tambah (a)	0.1525	m (dari titik pusat model)
4.	Berat massa tambah (m_a)	1.552	kg
5.	Panjang tali (L)	2.178	m
6.	Panjang tali terhadap jarak massa tambah (r)	2.1836	M

Tes pendulum dilakukan sebanyak 50 kali. Hasil pengukuran dari periode gerak pendulum model fisik pada kondisi 1 dan kondisi 2 disajikan dalam LAMPIRAN. Rata-rata periode yang didapat ditampilkan dalam Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Periode dan frekuensi gerak pendulum model kondisi 1 dan 2

1.	Periode gerak tanpa massa tambah (T_0)	3.4752	detik
2.	Periode gerak dengan masa tambah (T_1)	3.434	detik
3.	Frekuensi tanpa massa tambah (ω_0)	1.81298	rad/s
4.	Frekuensi dengan massa tambah (ω_1)	1.82991	rad/s

Dari data-data pada Tabel 4.22 dapat ditentukan jarak dari titik tumpuan tali ke titik berat model (h) dengan menggunakan persamaan 4.6.

$$h = \frac{2m(r^2\omega_1^2 - Lg)}{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_o}\right)^2\right]Mg} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{h = 2.90023\ m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diketahui titik berat model adalah sebagai berikut :

KG = panjang total (dari ujung tali sampai keel) - h

KG = 341.2 – 290.023

KG = 51.17 cm dari keel

Dari hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model fisik terhadap titik gantung dengan persamaan 4.7.

$$I_{44} = I_{55} = \frac{mgh}{\omega_o^2} \quad (4.7)$$

$$I_{44} = I_{55} = \mathbf{142.1579\ kg.m^2}$$

Kemudian dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model relatif terhadap titik berat dengan Persamaan 4.8.

$$I_m = I - mh^2 \quad (4.8)$$

$$\mathbf{I_m = 4.0127\ kgm^2}$$

Nilai momen inersia yang diketahui dapat digunakan untuk mencari jari-jari girasi sesuai dengan Persamaan 4.9.

$$Radius\ girasi = \sqrt{\frac{I_m}{m}} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{Radius\ girasi = 0.49461\ m}$$

Karena massa terdistribusi merata relatif terhadap sumbu z, maka radius girasi *pitch* dan *roll* adalah identik dengan nilai 49.461 cm.

Tabel 4.23 menunjukkan perbandingan parameter model antara *prototype*, target dan model fisik. Model fisik valid apabila error yang terukur kurang dari 5%.

Tabel 4.23 Validasi model fisik

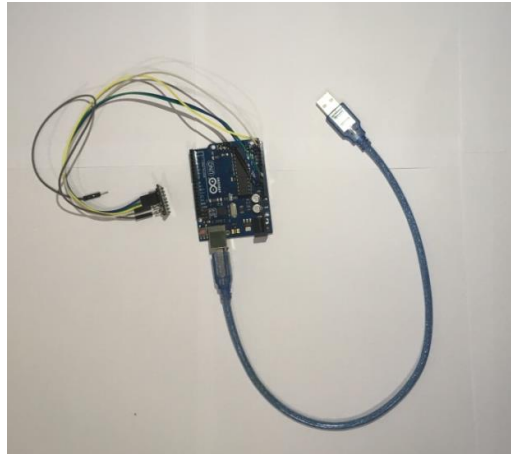
	Data		Target		Tercapai		Error
Diameter	16.00	m	12.80	cm	12.80	cm	0.0 %
<i>Draft</i>	135.03	m	108.00	cm	105.4	cm	0.241%
Length	154.23	m	123.4	cm	123.40	cm	0.0 %
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m	10.2	cm	10.20	cm	0.0 %
Weight	26531524.91	kg	13.58	kg	14	kg	3.09 %
KG	62.03	m	49.6	cm	51.178	cm	3.18%
Roll Gyrase	61.48	m	49.2	cm	49.461	cm	0.531 %
<i>Pitch Girasi</i>	61.48	m	49.2	cm	49.461	cm	0.531 %

4.4 INSTRUMENTASI PENGUKURAN

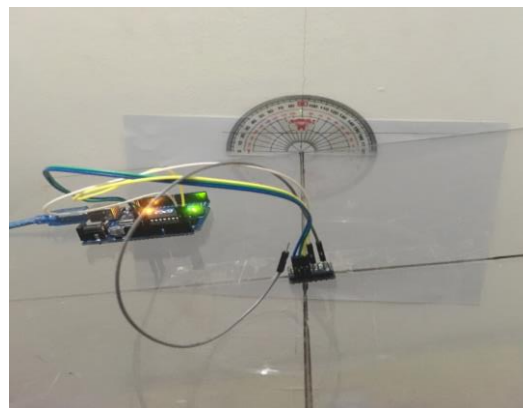
Pada studi eksperimen diperlukan suatu instrumentasi yang digunakan untuk mengukur gerak dan tegangan tali dari model fisik. Pengukuran gerak model fisik menggunakan *gyroscope* dan *image processing*, sedangkan pengukuran tegangan tali menggunakan instrumen *loadcell*. Sebelum dilakukan pengukuran pada percobaan/ eksperimen, ketiga instrumen ini harus dilakukan kalibrasi.

4.4.1 Kalibrasi *Gyroscope*

Kalibrasi *gyroscope* dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari sensor dengan nilai sudut yang terjadi (Gambar 4.14). Kalibrasi dilakukan dengan mengukur sudut 0°, 10°, 30°, 40°, 50°, dan 60° di atas meja dengan bantuan busur (Gambar 4.15). Proses ini dilakukan dengan dua arah pengukuran yaitu searah dan berlawanan jarum jam relatif terhadap *gyroscope*.



Gambar 4.14 Instrumen gyroscope



Gambar 4.15 Gyroscope dan geladak saat proses kalibrasi

```

COM19 (Arduino/Genuino Uno)

Angle of inclination in X axis = 358.74°
Angle of inclination in X axis = 359.36°
Angle of inclination in X axis = 359.82°
Angle of inclination in X axis = 359.34°
Angle of inclination in X axis = 359.27°
Angle of inclination in X axis = 359.18°
Angle of inclination in X axis = 0.29°
Angle of inclination in X axis = 359.59°
Angle of inclination in X axis = 0.17°

```

Gambar 4.16 Ouput Arduino pada arah sudut 0° derajat

Tabel 4.24 dan 4.25 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* saat *gyroscope* diputar searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam.

Tabel 4.24 Kalibrasi searah jarum jam

Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	0.20
10°	10.11
20°	20.05
30°	30.17
40°	40.13
50°	50.06
60°	60.38

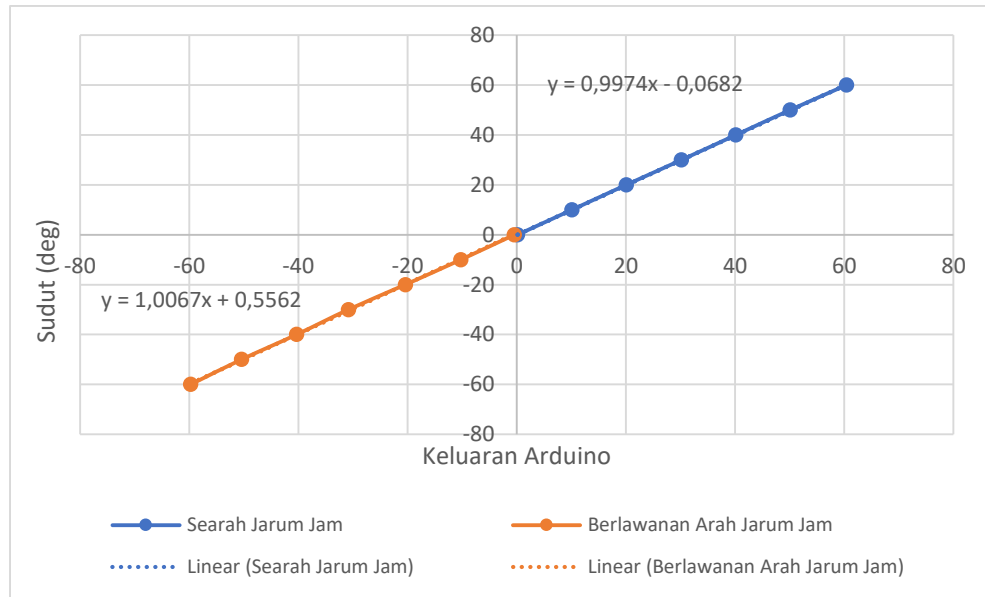
Tabel 4.25 Kalibrasi berlawanan jarum jam

Sudut (deg)	Output Giro (satuan)
-0°	-0.45
-10°	-10.26
-20°	-20.42
-30°	-30.85
-40°	-40.33
-50°	-50.42
-60°	-59.73

Tabel 4.24 dan Tabel 4.25 dapat dibuat grafik seperti Gambar 4.17. Berdasarkan hasil kalibrasi *gyroscope* yang dilakukan, diplot grafik dan persamaan yang dihasilkan ditampilkan pada Tabel 4.26. Berdasarkan grafik, hasil kalibrasi memiliki hubungan secara linier dan dapat disimpulkan bahwa sensor terkalibrasi untuk digunakan pada studi eksperimen kali ini.

Tabel 4.26 Persamaan *trendline* arduino

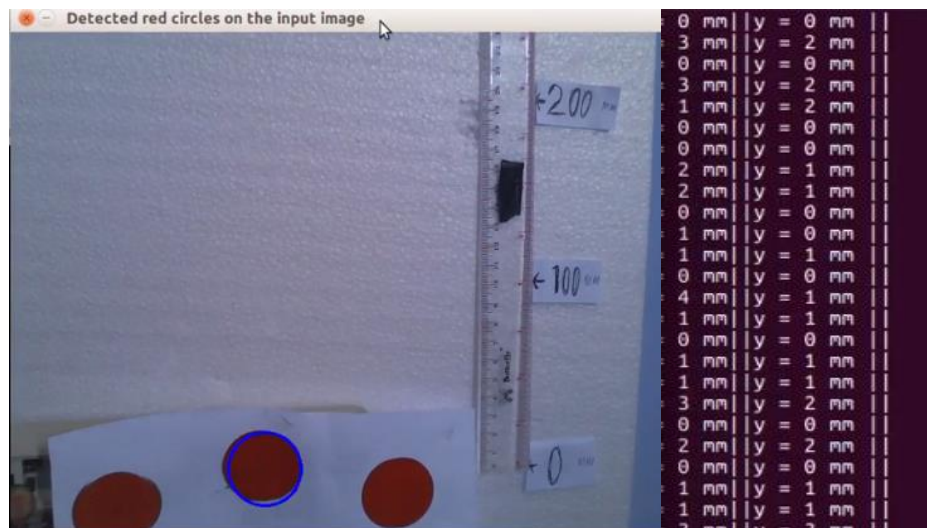
Searah Jarum Jam	$y = 0.997x - 0.068$
Berlawanan Arah Jarum Jam	$y = 1.006x + 0.556$



Gambar 4.17 Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk

4.4.2 Kalibrasi Image Processing

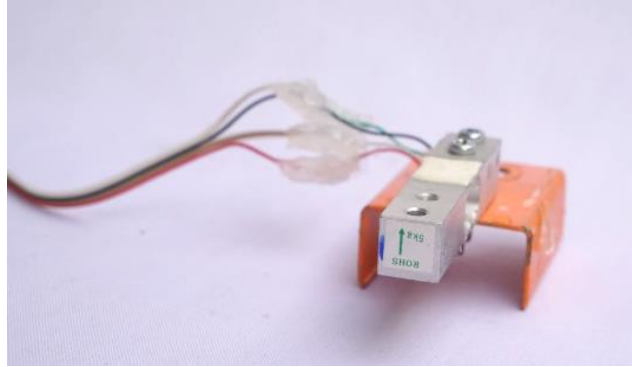
Proses kalibrasi *image processing* dilakukan dengan cara merekam kertas yang diberi gambar lingkaran berwarna merah seperti gambar 4.18. Pada proses kalibrasi kertas tersebut di gerakkan keatas dan kekanan sesuai dengan ukuran penggaris yang telah di siapkan dalam proses kalibrasi. Kemudian dilihat pada hasil dari computer yang telah menangkap perpindahan dari objek lingkaran berwarna merah yang ditinjau.



Gambar 4.18 Hasil dan Proses Kalibrasi *Image Processing*

4.4.3 Kalibrasi *Load Cell*

Tegangan tali diukur menggunakan instrumen *load cell*. Instrumen *load cell* yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah *load cell* dengan kapasitas beban maksimum 5 kg dan 1 kg. *Load cell* akan berfungsi jika beban mempunyai arah sesuai arah kerja *load cell*.



Gambar 4.19 Instrumen *load cell* dan arah beban

Kalibrasi dilakukan dengan menimbang beberapa beban terukur sehingga dapat dicari regresi linear dari nilai-nilai yang keluar. Pada kalibrasi ini digunakan 5 buah beban, 1000 gram, 500 gram, 200 gram, 100 gram dan 50 gram. Beban yang digunakan untuk pengukuran merupakan timbal timbangan yang ada dipasaran. timbal timbangan ditali dan digantungkan di sisi pengukuran *load cell*.

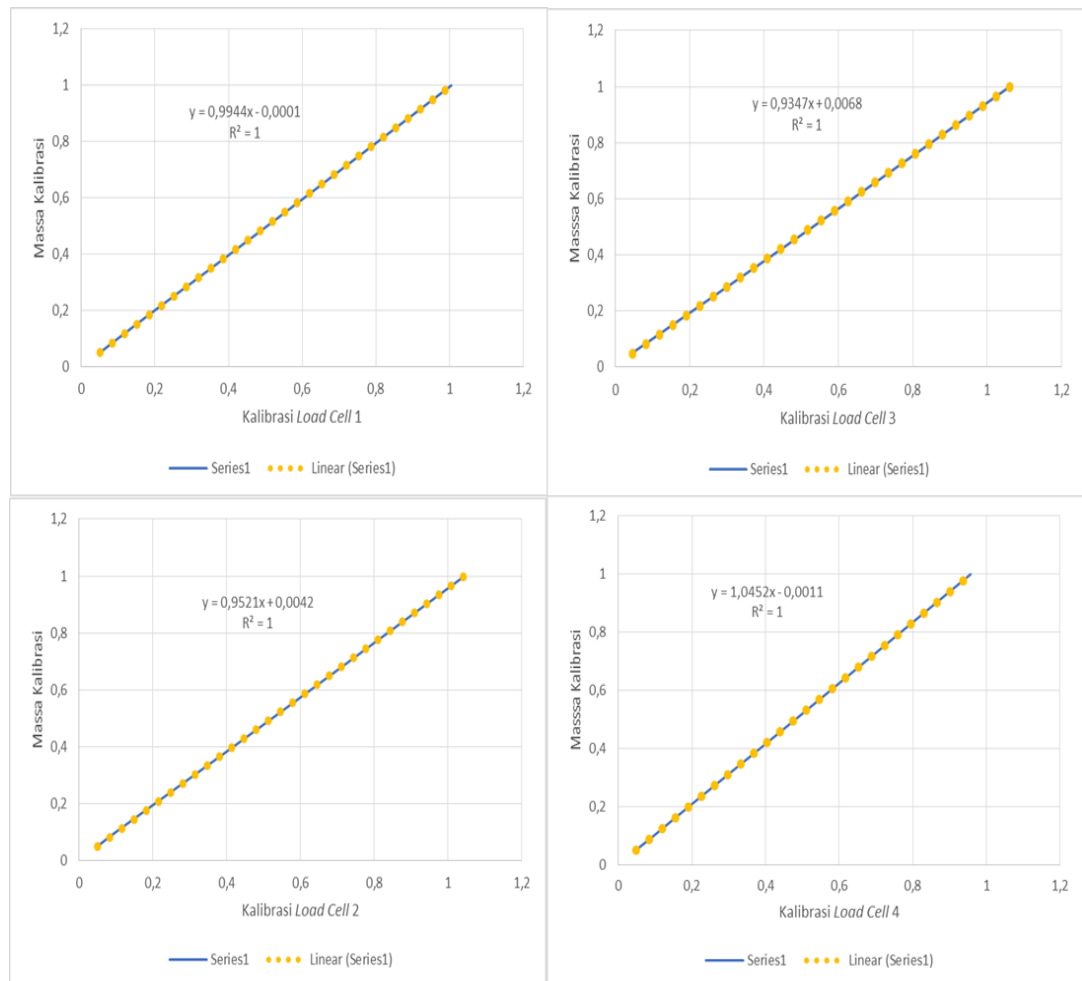


Gambar 4.20 Beban kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D), dan 50 g (E)

Data yang ditunjukkan dari proses kalibrasi dengan 5 timbangan pada setiap *load cell*. Setiap *load cell* mempunyai persamaan linier, sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya. Data hasil kalibrasi tiap *loadcell* ditampilkan pada Tabel 4.27 dan grafik regresinya pada Gambar 4.21.

Tabel 4.27 Data kalibrasi tiap *load cell*

Beban (kg)	<i>load Cell 1</i>	<i>Load Cell 2</i>	<i>Load Cell 3</i>	<i>Load Cell 4</i>
1	1,005	1.045	1.061	0.957
0,5	0.505	0.523	0.531	0.481
0,2	0.2	0.205	0.207	0.192
0,1	0.1	0.099	0.099	0.097
0,05	0.051	0.049	0.045	0.048
0	0	0	0	0



Gambar 4.21 Grafik Kalibari tiap *Load Cell*

Persamaan yang digunakan untuk mengkalibrasi keluaran *load cell* ditampilkan dalam Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Persamaan kalibrasi keluaran *load cell* dengan beban

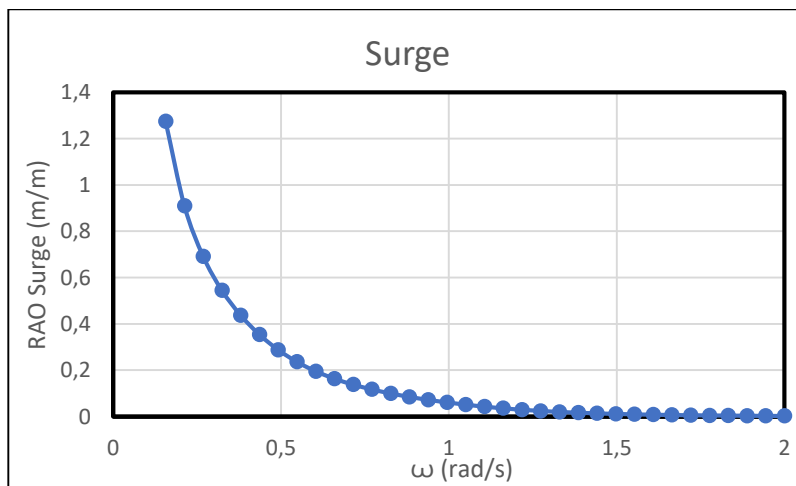
<i>LOAD CELL 1</i>	$y = 0,9944x - 0.0001$
<i>LOAD CELL 2</i>	$y = 0,9521x + 0.0042$
<i>LOAD CELL 3</i>	$y = 0.9347x + 0.0068$
<i>LOAD CELL 4</i>	$y = 1.0452x - 0.0011$

4.5 RAO TERAPUNG BEBAS

4.5.1 Metode Numeris

Respon gerak bangunan apung SPAR secara numeris menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. Setelah dilakukan pemodelan secara numeris selanjutnya adalah analisa SPAR pada kondisi terapung bebas (*free floating*). Pada kondisi terapung bebas SPAR dengan *helical strakes* dianalisa secara domain frekuensi menggunakan *featur* yang terdapat pada perangkat lunak ANSYS AQWA. Analisa dilakukan dengan rentang periode 40-3 detik dengan arah datang gelombang (*heading*) 0°. Pada laporan ini akan ditampilkan respon gerak SPAR dengan *helical strakes* dalam bentuk RAO (*respon amplitude operator*) gerakan (*surge*, *heave*, dan *pitch*).

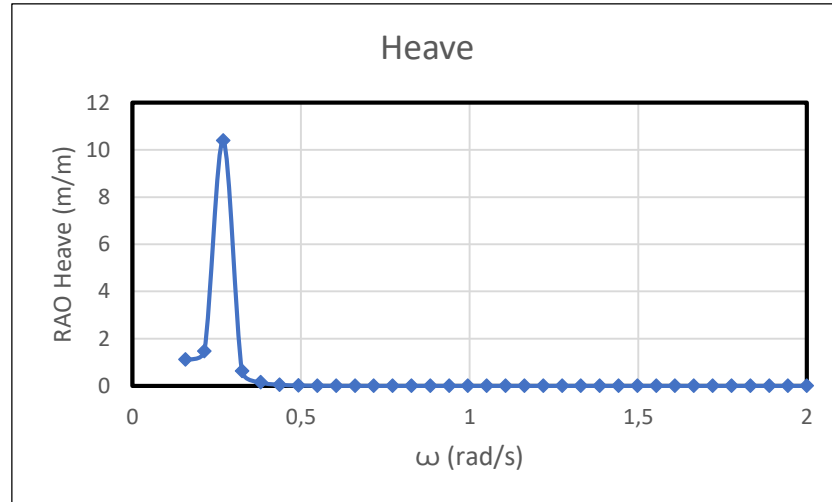
a. Mode Gerakan *Surge*



Gambar 4.23 RAO *free floating* gerakan *surge*

Dari grafik RAO (*respon amplitude operator*) gerakan *surge* dapat diketahui bahwa respon gerakan *surge* tertinggi berapa pada frekuensi 0,1571 rad/s dengan nilai RAO 1,2742 m/m

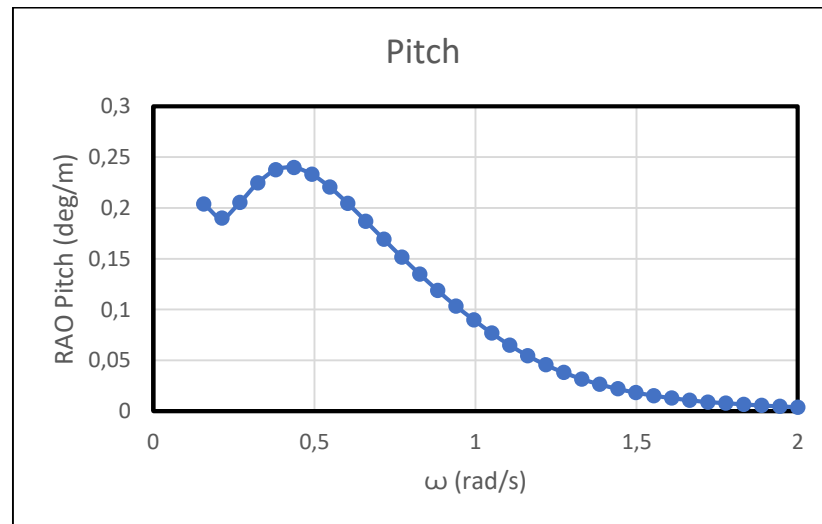
b. Mode Gerakan *Heave*



Gambar 4.22 RAO *free floating* gerakan *heave*

Dari grafik RAO (*respon amplitude operator*) gerakan *heave* dapat diketahui bahwa respon gerakan *heave* tertinggi berapa pada frekuensi 0,2688 rad/s dengan nilai RAO 10,4024 m/m.

c. Mode Gerakan *Pitch*



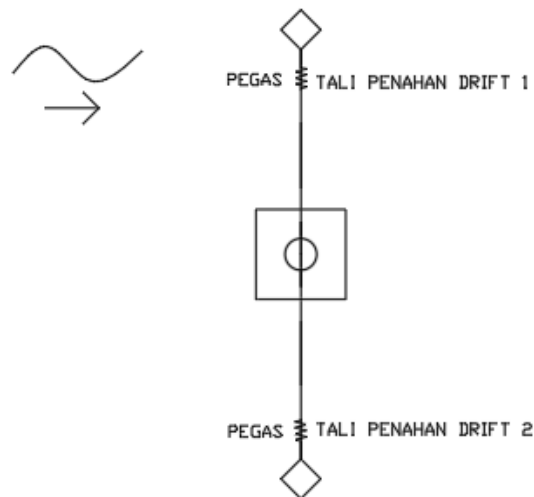
Gambar 4.24 RAO *free floating* gerakan *pitch*

Dari grafik RAO (*respon amplitude operator*) gerakan *pitch* dapat diketahui bahwa respon gerakan *pitch* tertinggi berapa pada frekuensi 0,4363 rad/s dengan nilai RAO 0,2398 m/m.

4.5.2 Metode Eksperimen

Analisa dengan metode eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Eksperimen pada kondisi terapung bebas dilakukan pada kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Uji eksperimen dilakukan sesuai dengan metode penelitian yang sudah dijelaskan pada bab3.

Pada pengujian eksperimen model SPAR kondisi terapung bebas diberikan dua buah tali penahan *drift* untuk menjaga model agar tetap dalam jangkauan kamera dan sesuai dengan arah yang diinginkan. Tali penahan *drift* dipasang renggang supaya tali tidak mempengaruhi gerak struktur, namun apabila terjadi *drifting* yang mengakibatkan bergesernya model maka tali akan menahannya. Pengujian terapung bebas berdasarkan konfigurasi sesuai dengan Gambar 4.25.

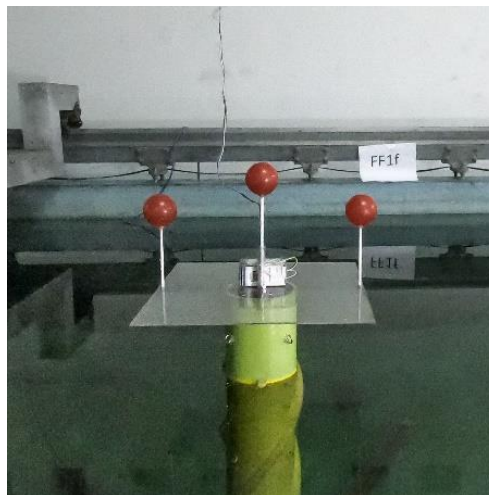


Gambar 4.25 Konfigurasi Pengujian Terapung Bebas

Eksperimen dilakukan dengan membangkitkan *wave maker* yang selanjutnya gelombang hasil pembangkitan akan mengenai model SPAR. Model akan di uji dengan tujuh variasi periode gelombang yang sesuai dengan data penskalaan. Pada eksperimen juga di berikan kode sebagai identitas untuk membedakan pengujian satu dengan yang lainnya. Tabel 4.32 menampilkan kode dan variasi periode gelombang pada pengujian eksperimen terapung bebas.

Tabel 4.29 Karakteristik gelombang eksperimen *free floating*

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	FF1a	40	3.60	2.5
2	FF1b	29	2.60	
3	FF1c	23.5	2.10	
4	FF1d	19	1.70	
5	FF1e	14.5	1.30	
6	FF1f	12.3	1.10	
7	FF1g	5.5	0.50	

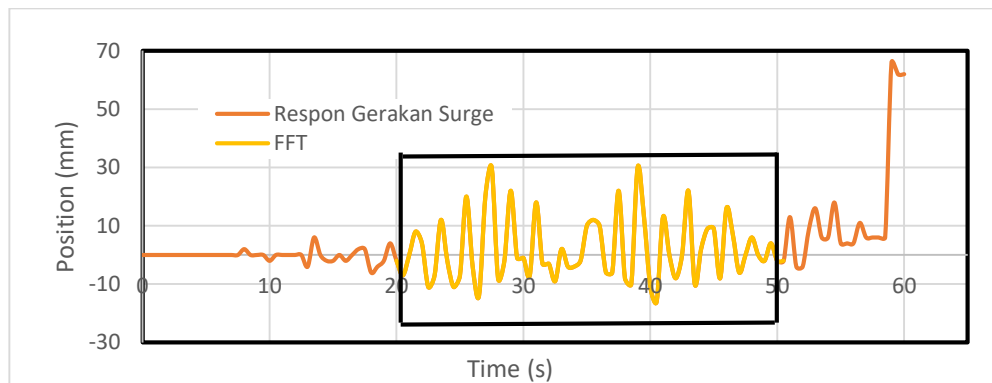


Gambar 4.26 Model SPAR kondisi *free floating* dan kode eksperimen

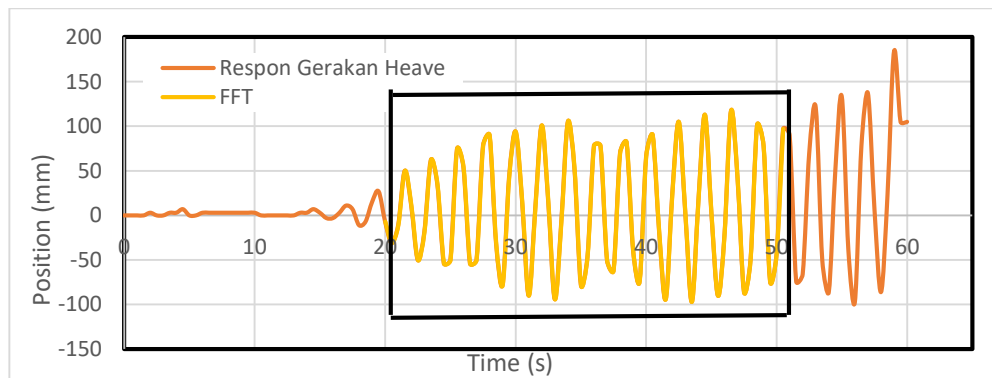


Gambar 4.27 Penempatan kamera dan lampu penerangan

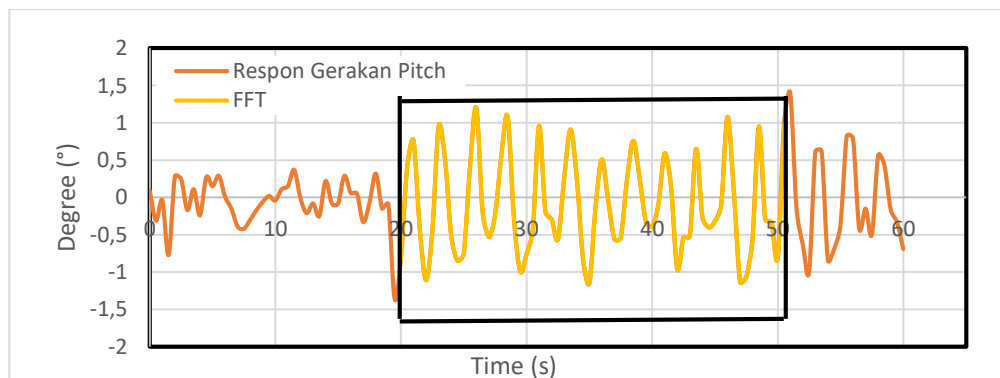
Respon model dicatat dengan instrumentasi *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* untuk mencatat respon gerakan *surge* dan *heave*, sedangkan *gyroscope* untuk mencatat gerakan *pitch*. Hasil dari pencatatan dalam bentuk *time history* yang ditunjukkan pada Gambar 4.28, 4.29, 4.30 sehingga untuk mencari nilai dari suatu gerakan pada periode tertentu dilakukan dengan metode *fast fourier transform* pada Gambar 4.31 dengan bantuan perangkat lunak MATLAB.



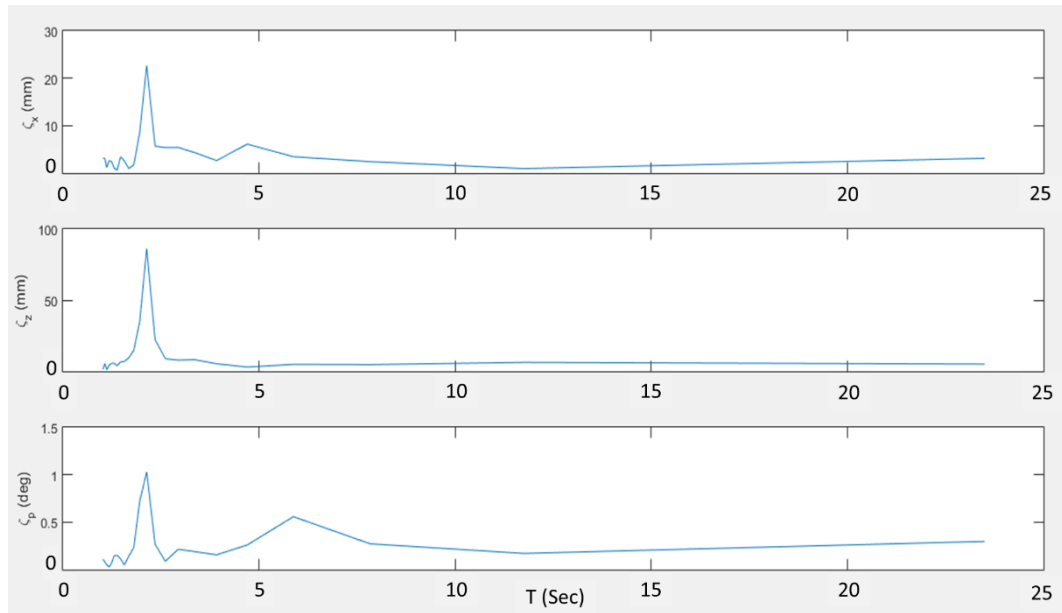
Gambar 4.28 Time history instrumen *image processing* gerakan surge



Gambar 4.29 Time history instrumen *image processing* gerakan heave



Gambar 4.20 Time history instrumen *gyroscope* gerakan pitch



Gambar 4.31 FFT respon gerakan pada periode gelombang 2,1 s

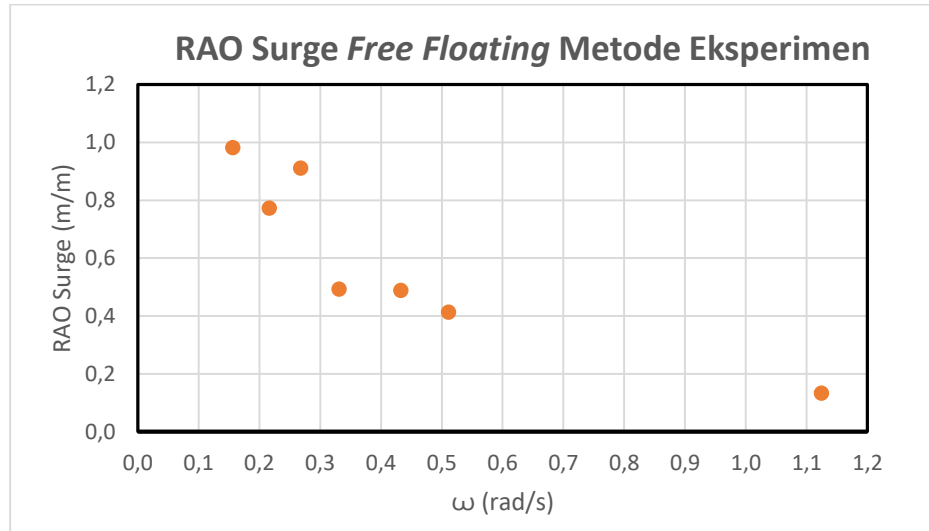
a. Mode Gerak *Surge*

Respon Amplitude Operator gerakan *surge* eksperimen dilakukan dengan cara menentukan nilai respon pada periode tertentu dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*). Sehingga didapatkan nilai respon gerakan *surge* yang terjadi pada model eksperimen. Tabel 4.30 menunjukkan nilai RAO gerakan *surge* pada setiap periode dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.30 RAO *surge free floating* metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Surge (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.9823	3.60
2	FF2a	0.7734	2.60
3	FF3a	0.9120	2.10
4	FF4a	0.4934	1.70
5	FF5a	0.4884	1.30
6	FF6a	0.4133	1.10
7	FF7a	0.1328	0.50

Kolom RAO gerakan *surge* pada Tabel 4.30 kemudian dibuat suatu grafik RAO gerakan *surge*. Gambar 4.32 merupakan grafik RAO gerakan *surge* pada frekuensi tertentu sesuai dengan periodenya.



Gambar 4.32 RAO *surge free floating* metode eksperimen

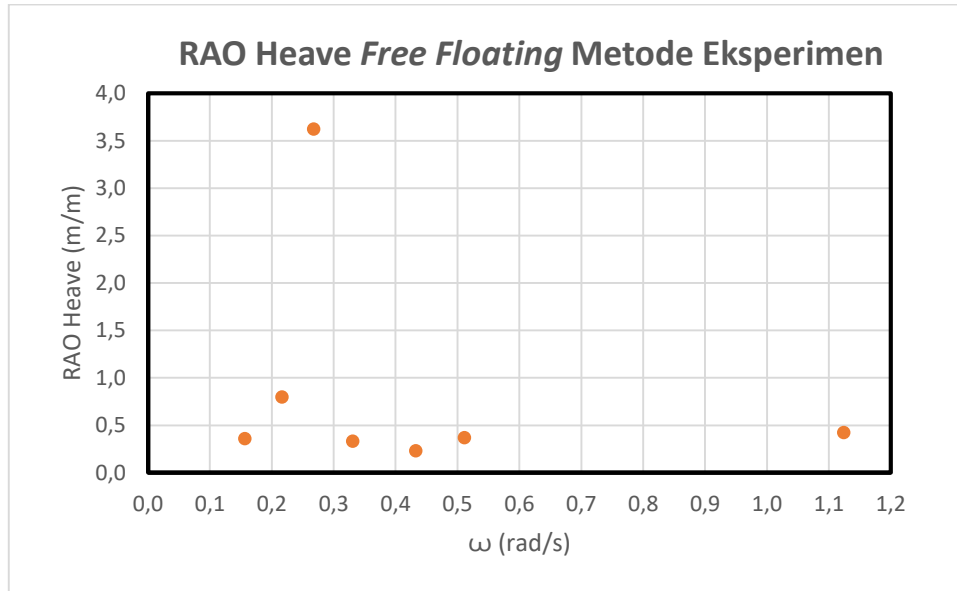
b. Mode Gerak *Heave*

Respon Amplitude Operator gerakan *heave* eksperimen dilakukan dengan cara dengan menentukan respon gerakan *surge*. Tabel 4.31 menunjukkan nilai RAO gerakan *heave* pada setiap periode dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.31 RAO *heave free floating* metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Heave (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.3613	3.60
2	FF2a	0.8000	2.60
3	FF3a	3.6231	2.10
4	FF4a	0.3336	1.70
5	FF5a	0.2320	1.30
6	FF6a	0.3688	1.10
7	FF7a	0.4240	0.50

Kolom RAO gerakan *surge* pada Tabel 4.31 kemudian dibuat suatu grafik RAO gerakan *heave*. Gambar 4.33 merupakan grafik RAO gerakan *surge* pada frekuensi tertentu sesuai dengan periodenya.



Gambar 4.33 RAO *heave free floating* metode eksperimen

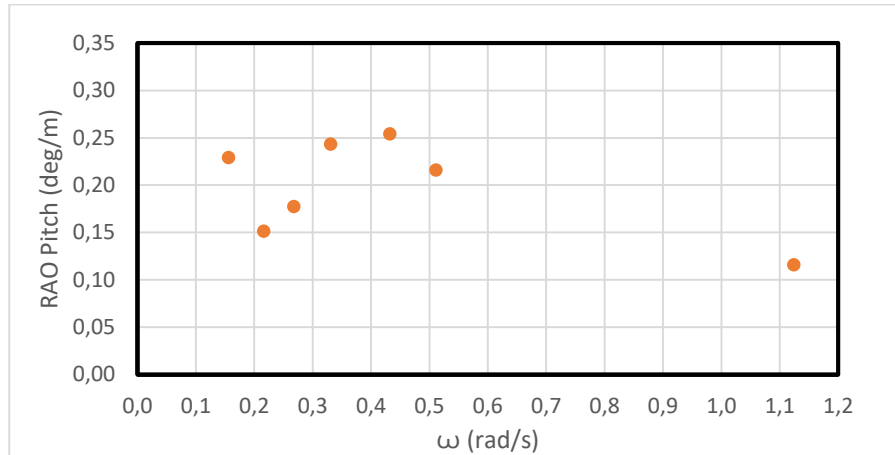
c. Mode Gerak *pitch*

Respon Amplitude Operator gerakan *pitch* eksperimen dilakukan dengan cara dengan menentukan respon gerakan *surge* dan *heave*. Tabel 4.32 menunjukkan nilai RAO gerakan *heave* pada setiap periode dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.32 RAO *pitch free floating* metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Pitch (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.2291	3.60
2	FF2a	0.1514	2.60
3	FF3a	0.1774	2.10
4	FF4a	0.2433	1.70
5	FF5a	0.2543	1.30
6	FF6a	0.2159	1.10
7	FF7a	0.1159	0.50

Kolom RAO gerakan *surge* pada Tabel 4.32 kemudian dibuat suatu grafik RAO gerakan *surge*. Gambar 4.34 merupakan grafik RAO gerakan *pitch* pada frekuensi tertentu sesuai dengan periodenya.

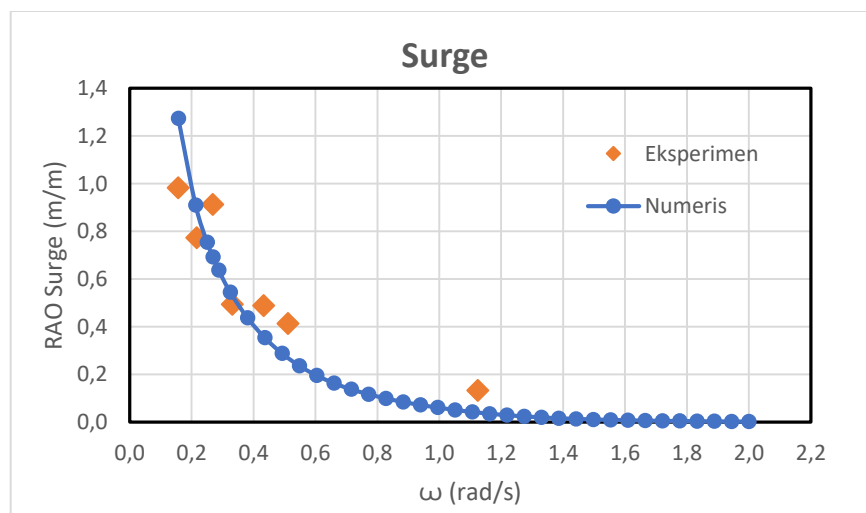


Gambar 4.34 RAO *pitch free floating* metode eksperimen

4.5.3 Perbandingan RAO Terapung Bebas Metode Numeris dan Eksperimen

Perbandingan *respon amplitude operator* kondisi terapung bebas (*free floating*) metode numeris dan eksperimen dengan arah datang gelombang 0° . Perbandingan dilakukan pada gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*. Gambar 4.35, 4.36, 4.37. adalah gambar hasil perbandingan RAO terapung bebas gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*.

a. Mode Gerak *Surge*



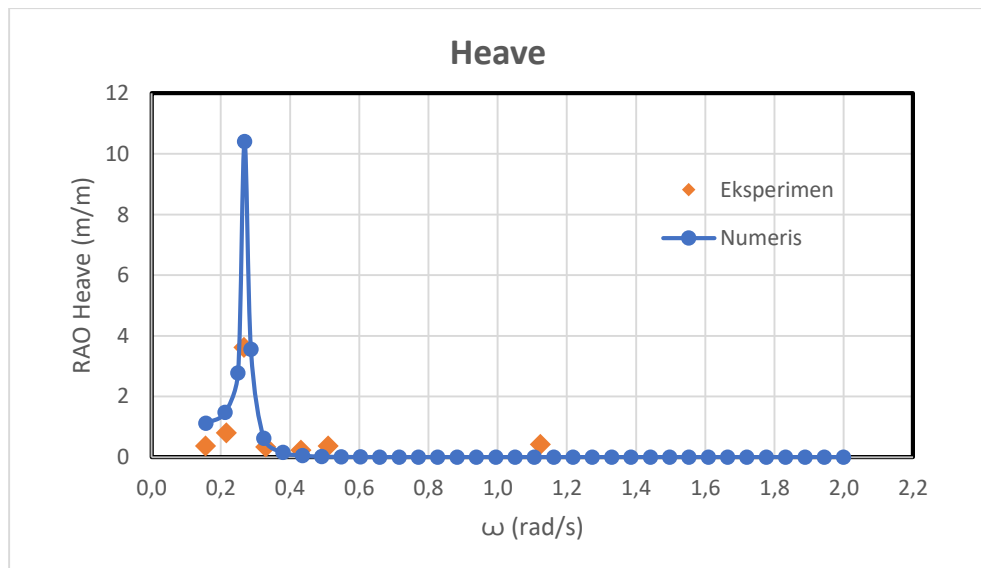
Gambar 4.35 Perbandingan RAO *surge free floating* metode numeris dan eksperimen

Perbandingan RAO *surge* terapung bebas tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, yaitu 0,1571 rad/s. RAO terbesar pada analisa numeris sebesar 1,2742 m/m dan pada metode eksperimen sebesar 0,9823 m/m. Tabel 4.33 menunjukkan perbandingan RAO *surge* terapung bebas pada frekuensi 0,1571 gerakan *surge* pada metode numeris dan eksperimen.

Tabel 4.33 RAO tertinggi *surge free floating* metode numeris dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1571	1.2742
Eksperimen	0.1571	0.9823

b. Mode Gerak *Heave*



Gambar 4.36 Perbandingan RAO *heave free floating* metode numeris dan eksperimen

Perbandingan RAO *heave* terapung bebas metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, yaitu 0,2688 rad/s. RAO terbesar pada analisa numeris sebesar 10,4024 m/m dan pada metode eksperimen sebesar 3,6231 m/m. Tabel 4.34 menunjukkan perbandingan RAO *heave* terapung bebas pada frekuensi natural gerakan *heave* pada metode numeris dan eksperimen.

Tabel 4.34 RAO tertinggi *heave free floating* metode numeris dan eksperimen

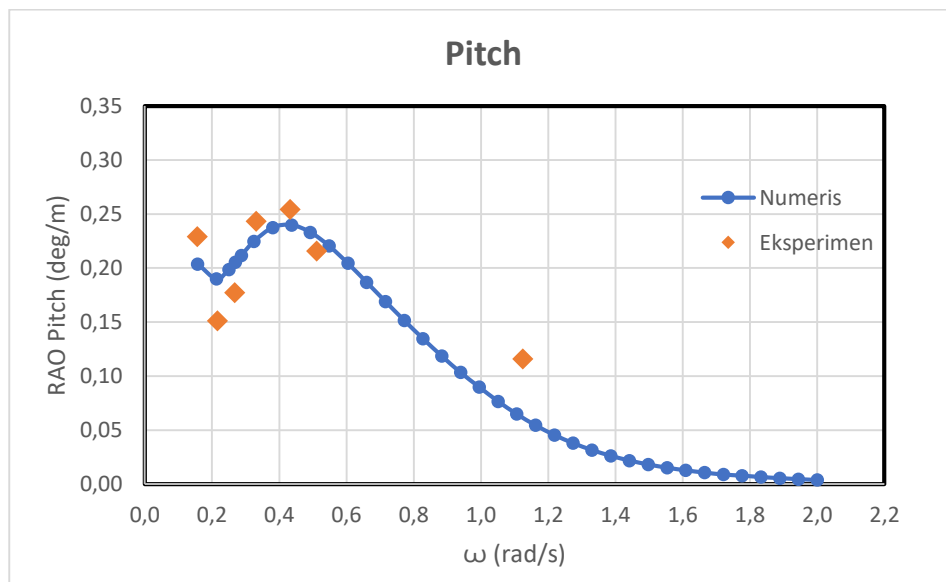
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.2688	10,4024
Eksperimen	0.2688	3,6231

c. Mode gerak *Pitch*

Perbandingan RAO *pitch* terapung bebas tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi yang sama, yaitu 0,4363 rad/s. RAO terbesar pada analisa numeris sebesar 0,2398 m/m dan pada metode eksperimen sebesar 0,2543 m/m. Tabel 4.35 menunjukkan perbandingan RAO *pitch* terapung bebas pada frekuensi dengan nilai RAO terbesar gerakan *pitch* pada metode numeris dan eksperimen .

Tabel 4.35 RAO tertinggi *pitch free floating* metode numeris dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.4363	0,2398
Eksperimen	0,4363	0.2543



Gambar 4.37 Perbandingan RAO *pitch free floating* metode numeris dan eksperimen

4.5.4 Perbandingan RAO SPAR *Helical Strakes* dan Tanpa *Helical Strakes*

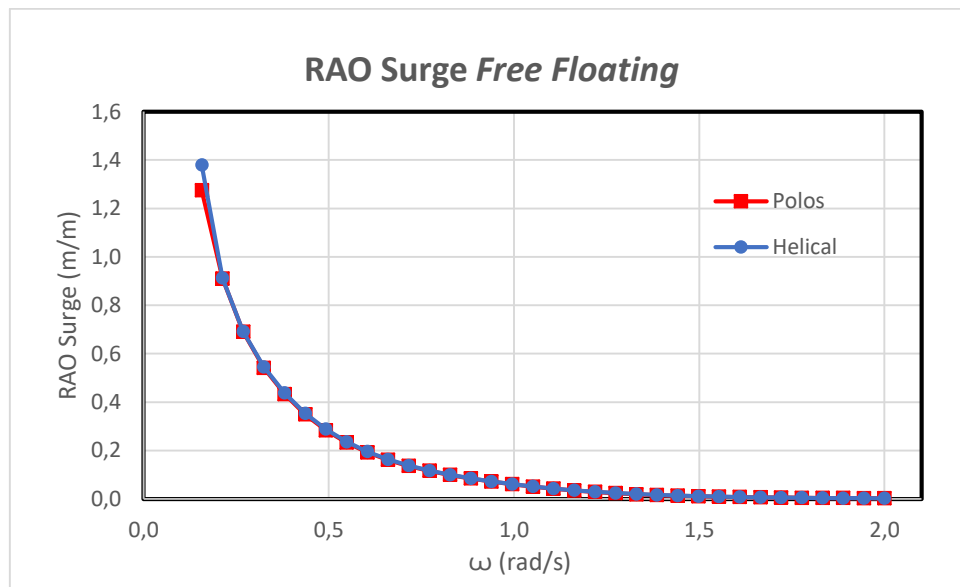
Perbandingan *respon amplitude operator* kondisi terapung bebas (*free floating*) SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*. Gambar 4.38, 4.39, 4.40. adalah gambar hasil perbandingan RAO terapung bebas gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*.

a. Mode Gerak *surge*

Perbandingan RAO *surge* terapung bebas SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* menunjukkan posisi frekuensi yang sama, yaitu 1,571 rad/s. RAO terbesar pada SPAR dengan *helical strakes* sebesar 1,2742 m/m dan pada SPAR tanpa *helical strakes* sebesar 1,2789 m/m. Tabel 4.36 menunjukkan perbandingan RAO *surge* terapung bebas pada frekuensi natural gerakan *surge* pada metode numeris dan eksperimen.

Tabel 4.36 RAO tertinggi *surge free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.2742
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.2789



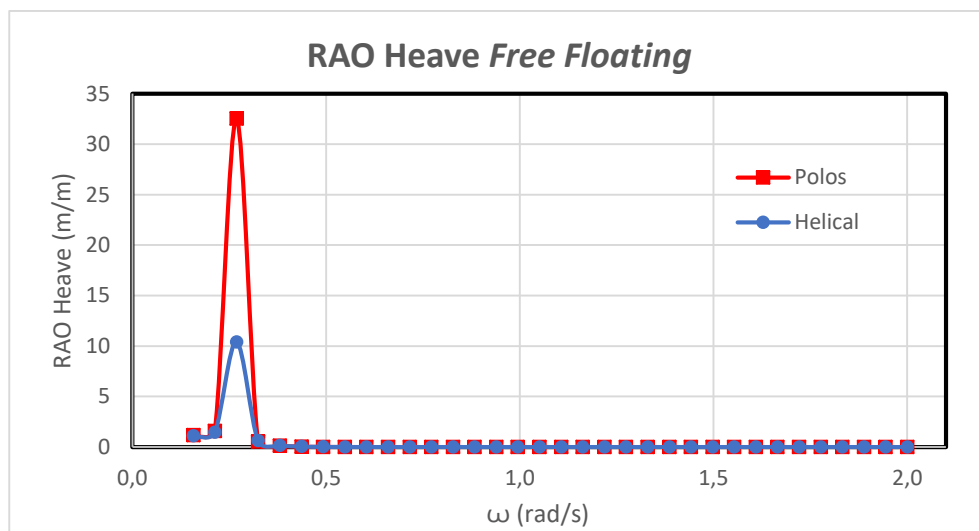
Gambar 4.38 Perbandingan RAO *surge free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

b. Mode Gerak *Heave*

Perbandingan RAO *heave* terapung bebas SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, yaitu 0,2688 rad/s. RAO terbesar pada SPAR dengan *helical strakes* sebesar 10,4024 m/m dan pada SPAR tanpa *helical strakes* sebesar 35,5342 m/m. Tabel 4.37 merupakan perbandingan RAO *heave free floating* SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*.

Tabel 4.37 RAO tertinggi *heave free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.2688	10.4024
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.2688	35.5342



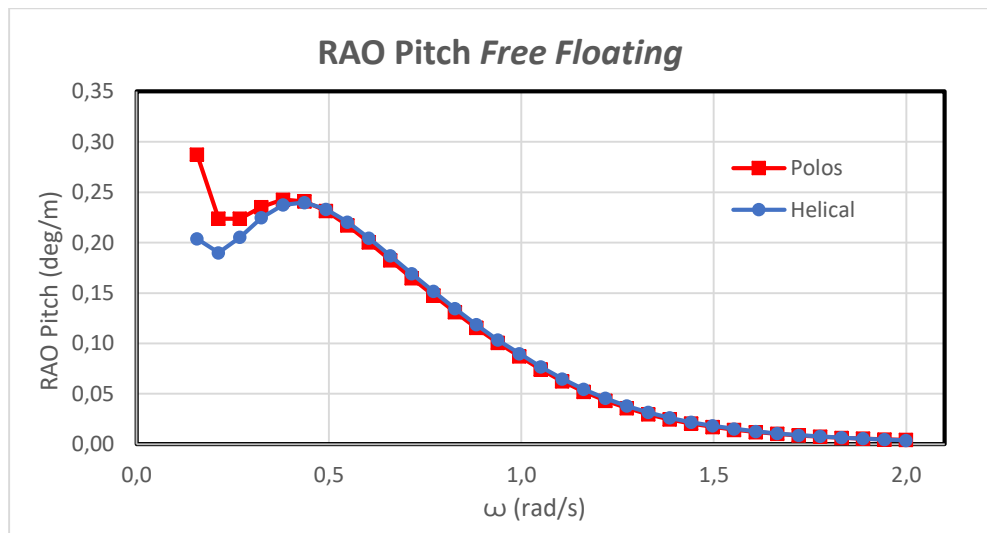
Gambar 4.39 Perbandingan RAO *heave free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

c. Mode Gerak *Pitch*

Perbandingan RAO *pitch* terbesar pada SPAR dengan *helical strakes* memiliki nilai sebesar 0,2398 m/m pada frekuensi 0,4363 rad/s dan SPAR tanpa *helical strakes* memiliki nilai sebesar 0,2873 m/m pada frekuensi 0,1571 rad/s. Tabel 4.35 menunjukkan perbandingan RAO *pitch* terapung bebas pada frekuensi dengan nilai RAO terbesar gerakan *pitch*.

Tabel 4.38 RAO tertinggi *pitch free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.4363	0.2398
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.1571	0.2873

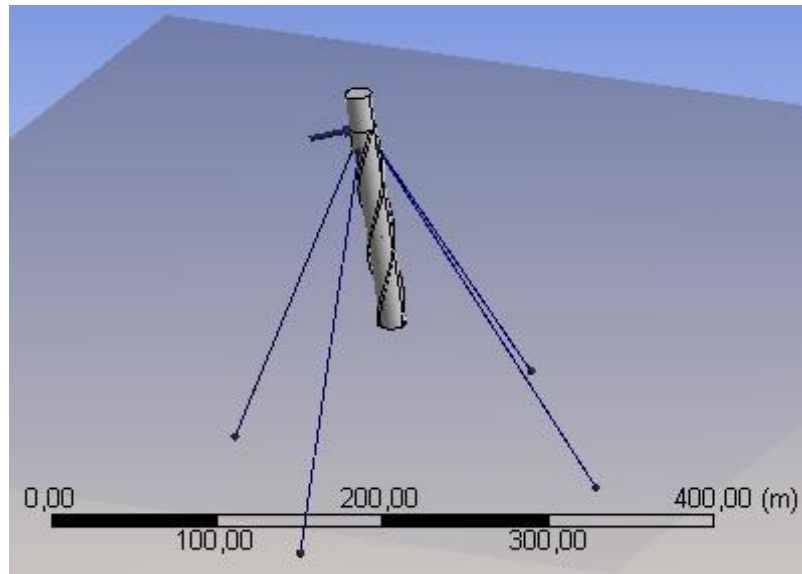


Gambar 4.40 Perbandingan RAO *pitch free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

4.6 RAO TERTAMBAT

4.6.1 Metode Numeris

Respon gerak SPAR tertambat secara numeris menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. Setelah dilakukan pemodelan secara numeris selanjutnya adalah analisa SPAR pada kondisi tertambat dengan menambahkan empat tali tambat pada SPAR. Tali tambat yang di gunakan adalah *wire rope* dengan panjang 245.5 m. properti tali tambat yang di gunakan sesuai dengan Tabel 4.18. Pada kondisi tertambat SPAR dengan *helical strakes* dianalisa secara domain waktu. Analisa dilakukan dengan arah datang gelombang (*heading*) 0° selama satu jam. Pada laporan ini akan di tampilkan respon gerak SPAR dengan *helical strakes* dalam bentuk RAO dan RAO tension akan yang dibandingkan dengan MINI SPAR tanpa *helical strakes* yang telah diteliti pada tugas akhir sebelumnya.

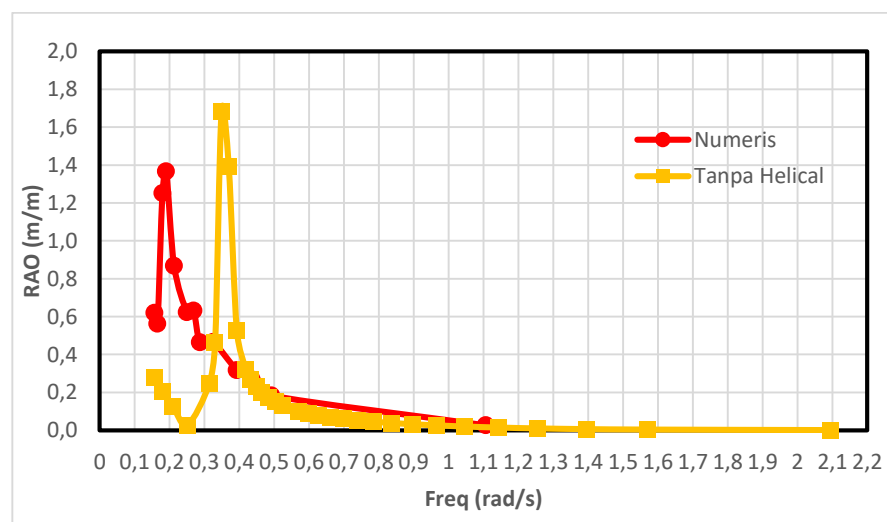


Gambar 4.41 Kondisi tertambat dalam ANSYS AQWA

Respon gerak SPAR merupakan respon dalam bentuk *time history* yang mencatat seluruh gerakan struktur SPAR dalam rentan waktu satu jam. Sehingga untuk mencari nilai dari suatu gerakan pada periode tertentu dilakukan dengan metode *fast fourier transform* dengan bantuan perangkat lunak MATLAB.

a. Mode Gerak *Surge*

Respon Amplitude Operator gerakan *surge* tertambat dilakukan dengan cara menentukan nilai respon pada periode tertentu dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*). Gambar 4.42 merupakan grafik RAO gerakan *surge* pada frekuensi tertentu.

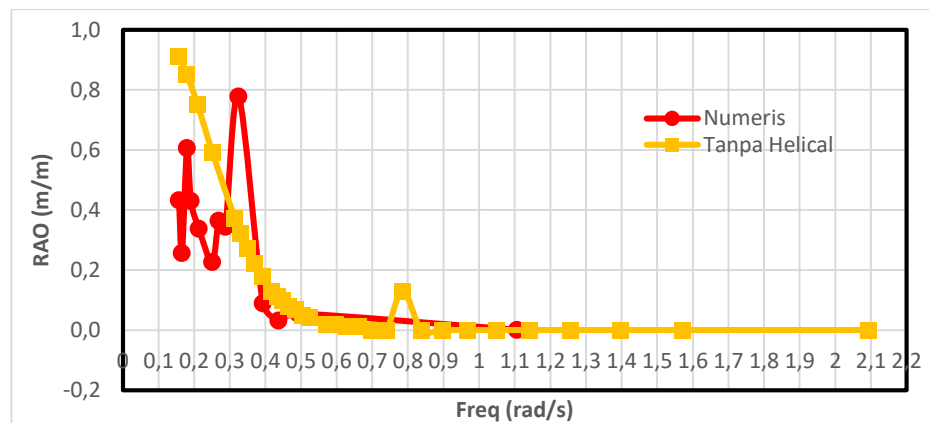


Gambar 4.42 RAO *surge* tertambat numeris

Dari grafik RAO (*respon amplitude operator*) gerakan *surge* dapat diketahui bahwa respon gerakan *surge* tertinggi berapa pada frekuensi 0,1904 rad/s dengan nilai RAO 1,367 m/m. sedangkan pada SPAR tanpa helical memiliki periode alami yang bergeser menjadi 0,3491 rad/s dengan nilai RAO 1,68 m. Perbedaan nilai perbandingan hasil keduanya adalah 18%.

b. Mode Gerak *Heave*

Respon Amplitude Operator gerakan *heave* tertambat dilakukan dengan cara dengan menentukan respon gerakan *surge*, yaitu dengan menggunakan metode FFT (*fast fourier transform*).

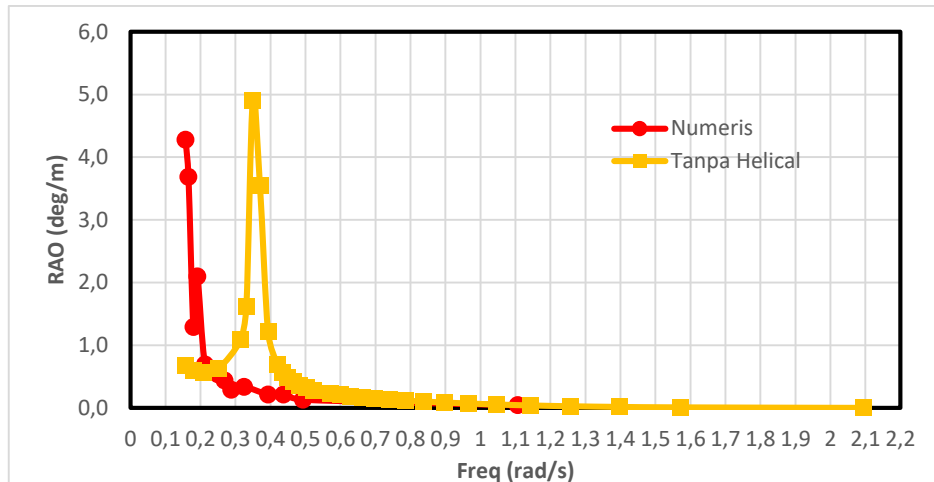


Gambar 4.43 RAO *heave* tertambat numeris

Dari grafik RAO (*respon amplitude operator*) gerakan *heave* dapat diketahui bahwa respon gerakan *heave* tertinggi berapa pada frekuensi 0,3246 rad/s dengan nilai RAO 0,778 m/m. Sedangkan SPAR tanpa helical mempunyai nilai RAO 0,085 pada frekuensi 0,571 rad/s. Perbedaan nilai RAO adalah 8%.

c. Mode Gerak *pitch*

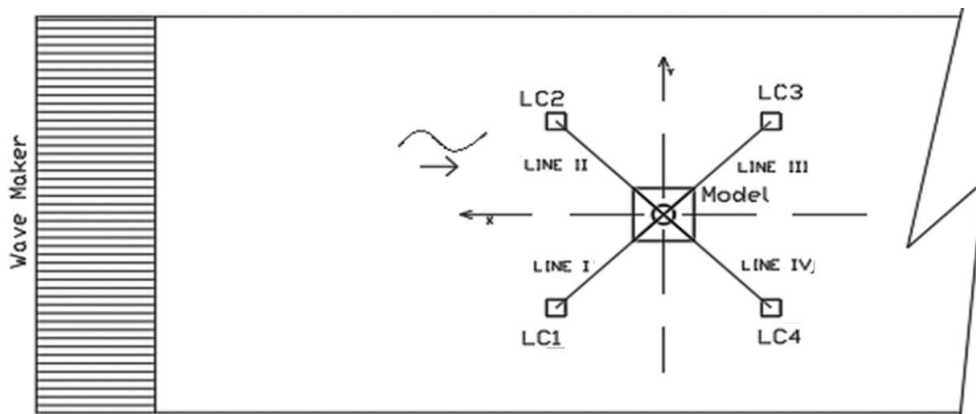
Respon Amplitude Operator gerakan *pitch* tertambat dilakukan dengan cara dengan menentukan respon gerakan *surge* dan *heave* tertambat. Dari grafik RAO (*respon amplitude operator*) gerakan *pitch* Gambar 4.44 dapat diketahui bahwa respon gerakan *pitch* tertinggi berapa pada frekuensi 0,1571 rad/s dengan nilai RAO 4,276 m/m. sedngkan untuk SPAR polos, memiliki hilai RAO 4,896 deg/m pada frekuensi 0,325 deg/m dengan perbedaan sebesar 12,5%.



Gambar 4.44 RAO *pitch* tertambat numeris

4.6.2 Metode Eksperimen

Analisa dengan metode eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Eksperimen pada kondisi terapung bebas dilakukan pada kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Uji eksperimen dilakukan sesuai dengan metode penelitian yang sudah dijelaskan pada BAB3. Eksperimen pada kondisi tertambat dilakukan sesuai dengan konfigurasi dalam Gambar 4.45.



Gambar 4.45 Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat

Pada pengujian eksperimen SPAR kondisi tertambat digunakan empat buah tali tambat yang di atur dengan panjang yang sama. Pengaturan tali tambat ini dalam kondisi tertambat *taut* atau tegang. Tali dihubungkan pada *load cell* yang berada pada jangkar di dalam kolam uji untuk mencatat tegangan tali yang terjadi.

Eksperimen dilakukan dengan membangkitkan *wave maker* yang selanjutnya gelombang hasil pembangkitan akan mengenai model SPAR. Model akan di uji dengan tujuh variasi periode gelombang yang sesuai dengan data penskalaan. Pada eksperimen juga di berikan kode sebagai identitas untuk membedakan pengujian satu dengan yang lainnya. Tabel 4.39 ditampilkan kode dan variasi periode gelombang pada pengujian eksperimen tertambat.

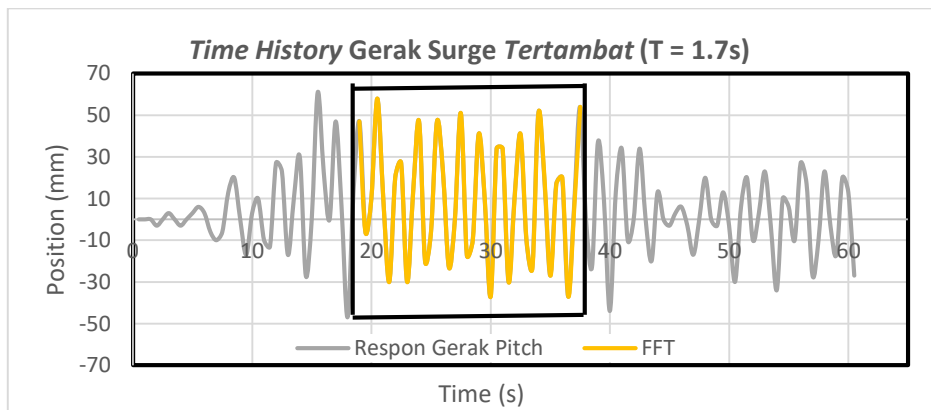
Tabel 4.39 Karakteristik gelombang eksperimen tertambat

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	TT1a	40	3.60	2.5
2	TT1b	29	2.60	
3	TT1c	23.5	2.10	
4	TT1d	19	1.70	
5	TT1e	14.5	1.30	
6	TT1f	12.3	1.10	
7	TT1g	5.5	0.50	

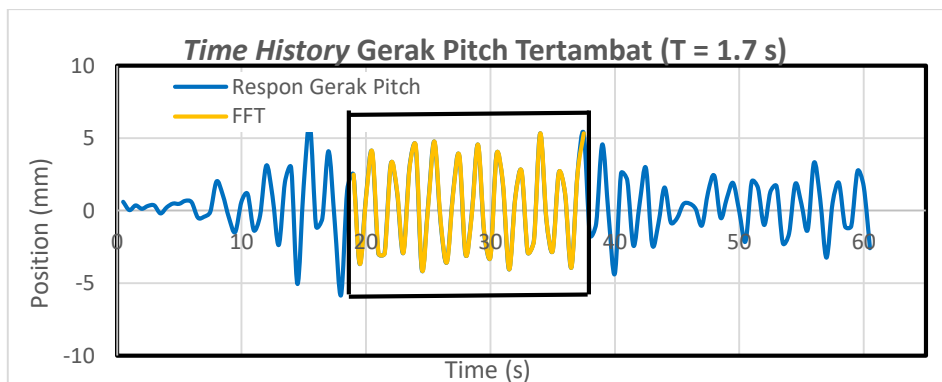


Gambar 4.46 Eksperimen SPAR tertambat

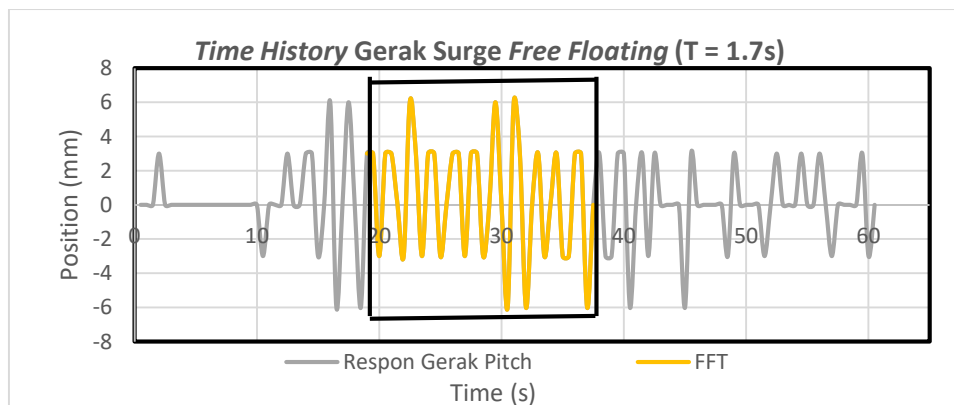
Respon model dicatat dengan instrumentasi *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* untuk mencatat respon gerakan *surge* dan *heave*, sedangkan *gyroscope* untuk mencatat gerakan *pitch*. Hasil dari pencatatan dalam bentuk *time history* sehingga untuk mencari nilai dari suatu gerakan pada periode tertentu dilakukan dengan metode *fast fourier transform* dengan bantuan perangkat lunak MATLAB seperti ketika menganalisa data saat kondisi terapung bebas (*free floating*).



Gambar 4.47 Time history gerak surge tertambat



Gambar 4.48 Time history gerak pitch tertambat



Gambar 4.49 Time history gerak heave tertambat

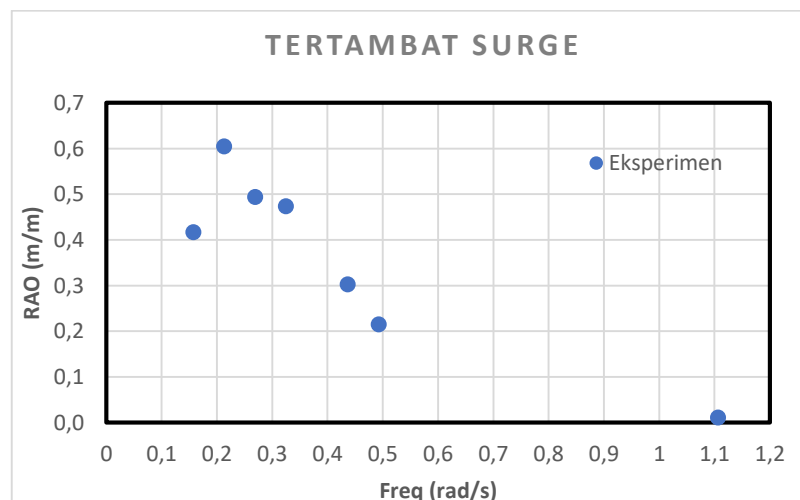
a. Mode Gerak Surge

Respon Amplitude Operator gerakan *surge* eksperimen dilakukan dengan cara menentukan nilai respon pada periode tertentu dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*). Sehingga didapatkan nilai respon gerakan *surge* yang terjadi pada model eksperimen. Tabel 4.40 menunjukkan nilai RAO gerakan *surge* pada setiap periode dan perbandingan antara periode respon dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.40 RAO *surge* tertambat metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Surge (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0,417	3.60
2	TT1b	0,605	2.60
3	TT1c	0,494	2.10
4	TT1d	0,474	1.70
5	TT1e	0,303	1.30
6	TT1f	0,215	1.10
7	TT1g	0,011	0.50

Kolom RAO gerakan *surge* pada Tabel 4.40 kemudian dibuat suatu grafik RAO gerakan *surge*. Gambar 4.50 merupakan grafik RAO gerakan *surge* pada frekuensi tertentu sesuai dengan periodenya.



Gambar 4.50 RAO *surge* tertambat eksperimen

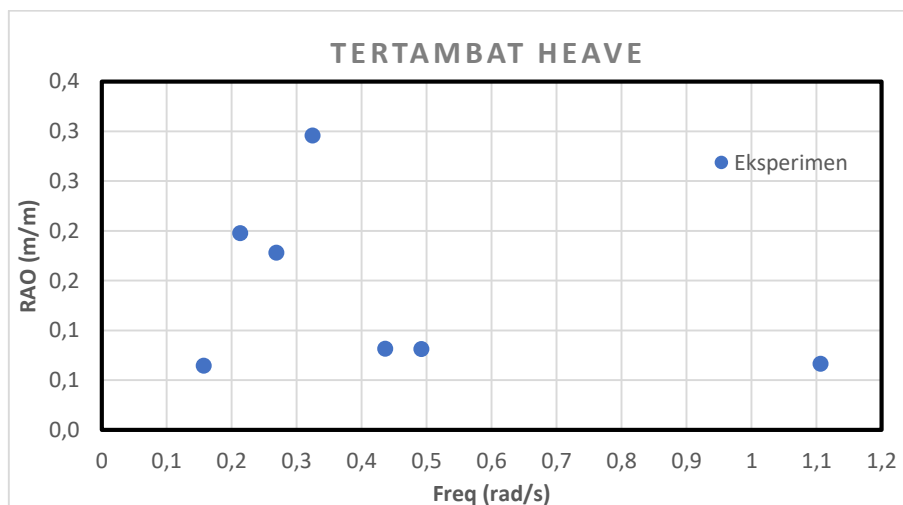
b. Mode Gerak *Heave*

Respon Amplitude Operator gerakan *heave* eksperimen dilakukan dengan cara dengan menentukan respon gerakan *surge*, yaitu dengan menggunakan metode FFT (*fast fourier transform*) . Tabel 4.41 menunjukan nilai RAO gerakan *heave* pada setiap periode dan perbandingan antara periode respon dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.41 RAO *heave* tertambat eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Heave (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0,065	3.60
2	TT1b	0,198	2.60
3	TT1c	0,178	2.10
4	TT1d	0,296	1.70
5	TT1e	0,082	1.30
6	TT1f	0,081	1.10
7	TT1g	0,067	0.50

Kolom RAO gerakan *heave* pada Tabel 4.41 kemudian dibuat suatu grafik RAO gerakan *heave*. Gambar 4.51 merupakan grafik RAO gerakan *heave* pada frekuensi tertentu sesuai dengan periodenya.



Gambar 4.51 RAO *heave* tertambat eksperimen

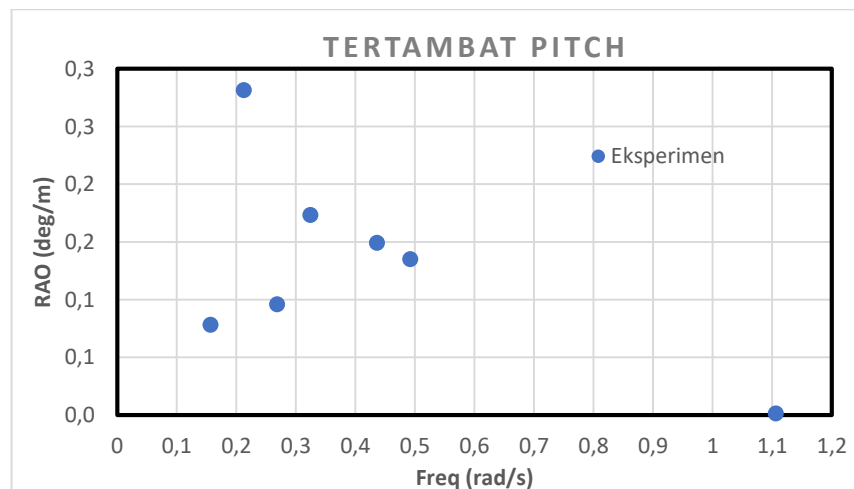
c. Mode Gerak *pitch*

Respon Amplitude Operator gerakan *pitch* eksperimen dilakukan dengan cara dengan menentukan respon gerakan *surge* dan *heave*. Tabel 4.42 menunjukkan nilai RAO gerakan *pitch* pada setiap periode dan perbandingan antara periode respon dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.42 RAO *pitch* tertambat eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Pitch (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0,0783	3.60
2	TT1b	0,2816	2.60
3	TT1c	0,0962	2.10
4	TT1d	0,1736	1.70
5	TT1e	0,1492	1.30
6	TT1f	0,1351	1.10
7	TT1g	0,0015	0.50

Kolom RAO gerakan *pitch* pada Tabel 4.42 kemudian dibuat suatu grafik RAO gerakan *pitch*. Gambar 4.52 merupakan grafik RAO gerakan *pitch* pada frekuensi tertentu sesuai dengan periodenya.



Gambar 4.52 RAO *pitch* tertambat eksperimen

4.6.3 Perbandingan RAO Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen

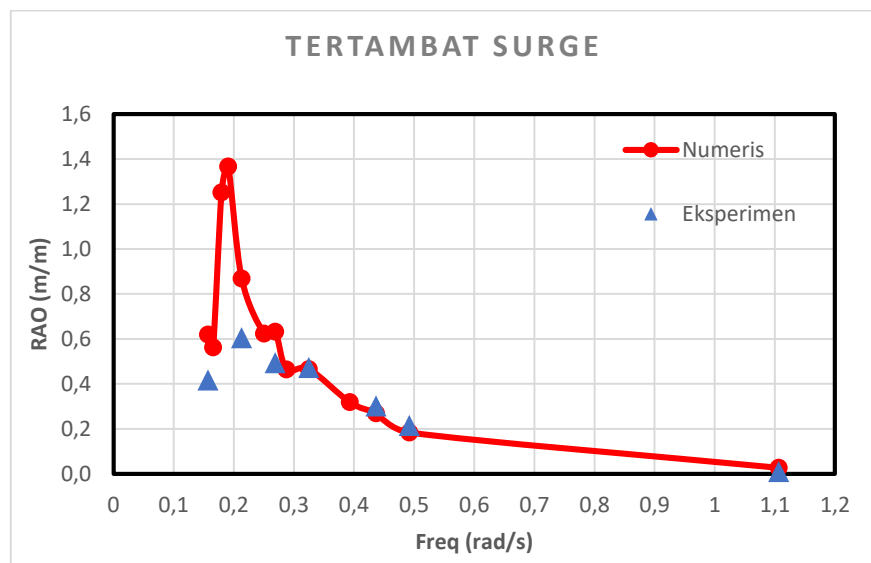
Perbandingan *response amplitude operator* kondisi tertambat metode numeris dan eksperimen dengan arah datang gelombang 0° . Perbandingan dilakukan pada gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*. Gambar 4.53, 4.54, 4.55. adalah gambar hasil perbandingan RAO terapung bebas gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*.

a. Mode Gerak *Surge*

Perbandingan RAO *surge* tertambat tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda. Perbedaan akibat dari proses eksperimen yang dilakukan belum dapat menangkap espon yang sebenarnya, hal tersebut dikarenakan waktu yang kurang dalam menjalankan *wave maker* saat uji eksperimen. Waktu yang digunakan dalam membangkitkan gelombang hanya 10 detik oleh Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.

Tabel 4.43 RAO tertinggi *surge* tertambat metode numeris dan eksperimen

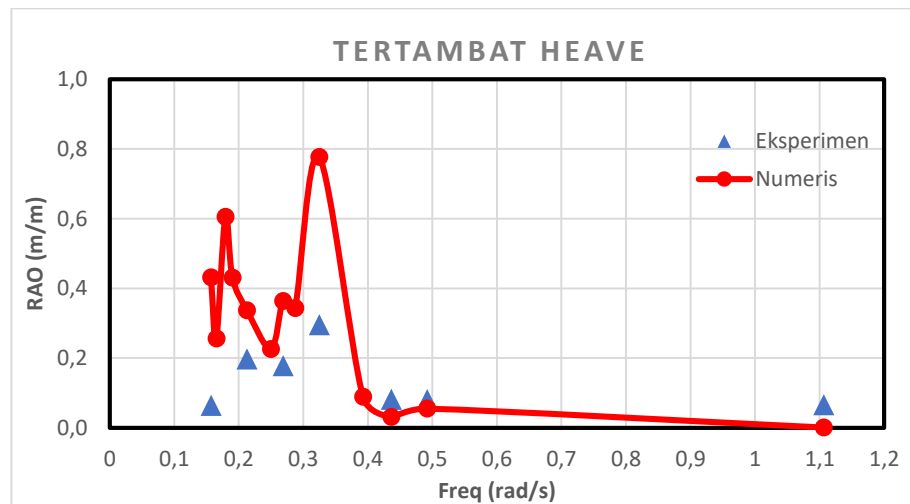
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1903	1.367
Eksperimen	0.2129	0.605



Gambar 4.53 Perbandingan RAO *surge* tertambat metode numeris dan eksperimen

b. Mode Gerak *Heave*

Tabel 4.34 menunjukkan perbandingan RAO *heave* tertambat pada frekuensi natural gerakan *heave* pada metode numeris dan eksperimen. Perbandingan RAO *heave* tertambat metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, yaitu 0.3245 rad/s. RAO terbesar pada analisa numeris sebesar 0.778 m/m dan pada metode eksperimen sebesar 0.295 m/m.



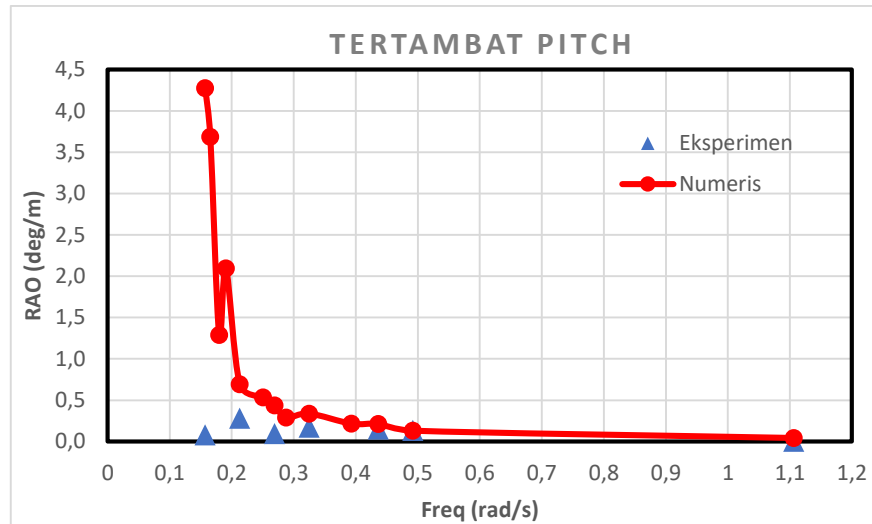
Gambar 4.54 Perbandingan RAO *heave* tertambat metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.44 RAO tertinggi *heave* tertambat metode numeris dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.3245	0.778
Eksperimen	0.3245	0.295

c. Mode gerak *Pitch*

Perbandingan RAO *pitch* tertambat tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda. Perbedaan akibat dari proses eksperimen yang dilakukan belum dapat menangkap respon yang sebenarnya, hal tersebut dikarenakan waktu yang kurang dalam menjalankan *wave maker* saat uji eksperimen. Waktu yang digunakan dalam membangkitkan gelombang hanya 10 detik oleh Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.



Gambar 4.55 Perbandingan RAO *pitch* tertambat metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.45 RAO tertinggi *pitch* tertambat metode numeris dan eksperimen

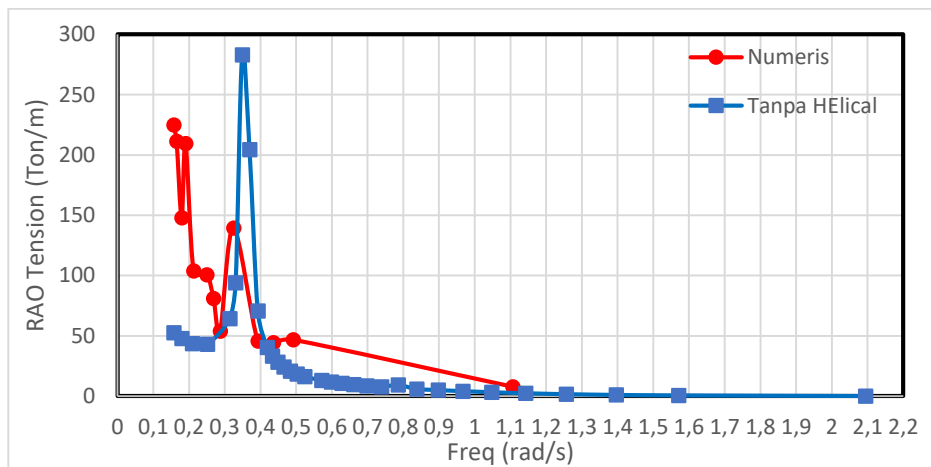
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Numerik	0.1570	4.276
Eksperimen	0.2129	0.281

4.7 TEGANGAN TALI

Tegangan tali pada sistem tambat struktur SPAR terjadi karena adanya gaya tarikan pada tali tambat yang besarnya sesuai dengan gaya gelombang yang terjadi. Tegangan tali pada struktur SPAR diukur dengan menggunakan dua metode, yaitu secara numeris dan eksperimen. Tegangan tali yang diukur menggunakan metode numeris menggunakan bantuan perangkat lunak ANSYS AQWA. Pada metode eksperimen menggunakan instrumentasi *load cell* untuk mengukur tegangan tali pada saat uji eksperimen. properties tali tambat yang digunakan mengacu pada data yang terdapat pada Tabel 4.18. Tali tambat disajikan dalam RAO tegangan yang merupakan perbandingan amplitudo respon tegangan tali tambat dengan amplitudo gelombang.

4.7.1 Metode Numeris

Tegangan tali pada struktur SPAR ketika dianalisa secara numeris dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. Konfigurasi tali tambat dan analisa yang digunakan sama ketika uji eksperimen respon gerak tertambat, yaitu dengan menggunakan analisa domain waktu sehingga tegangan tali dalam bentuk *time history* yang mencatat seluruh gerakan struktur SPAR dalam rentan waktu satu jam. Pada metode ini akan dibandingkan dengan tegangan tali SPAR tanpa *helical strakes*.

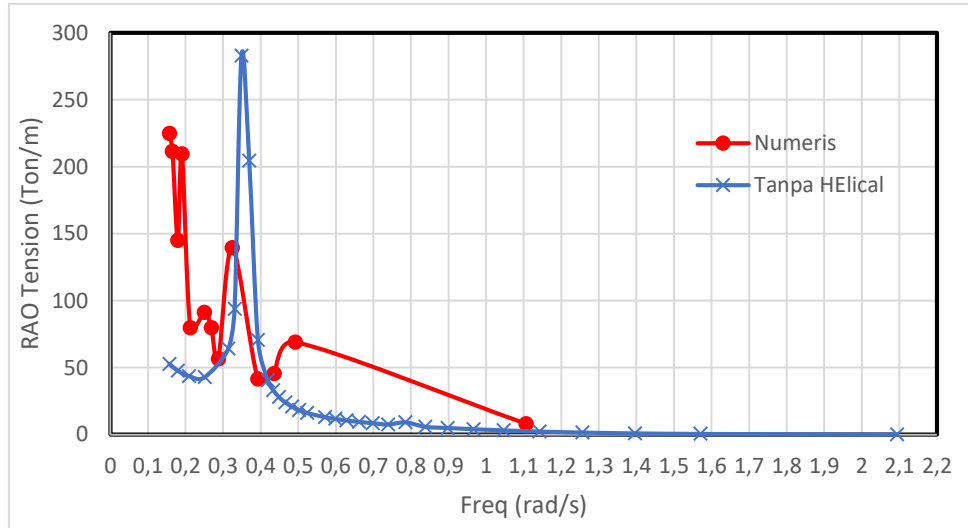


Gambar 4.56 RAO *tension* tali tambat I tertambat taut numeris

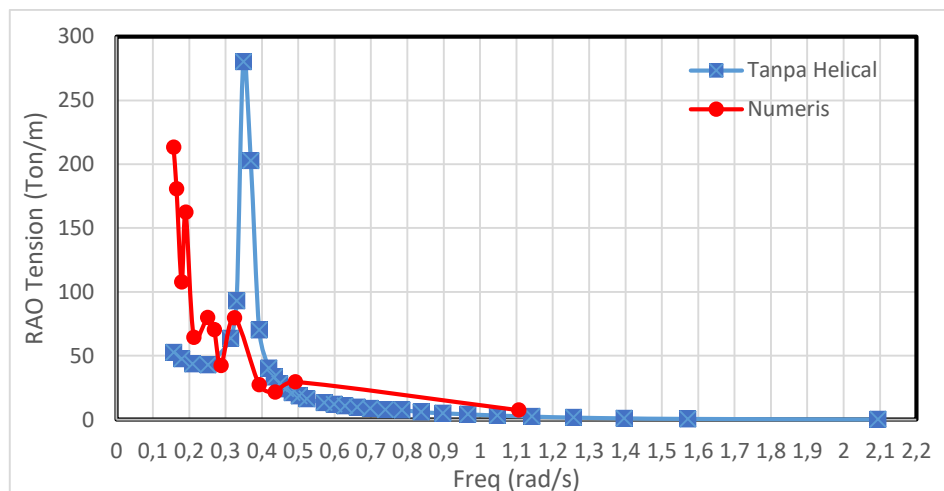
Perbandingan RAO tegangan SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat 1 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan *helical strakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical strakes* bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR dengan *helical strakes* adalah 224,81 Ton/m dan nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR tanpa *helical strakes* adalah 282,86 Ton/m.

Perbandingan RAO tegangan SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat 2 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan *helical strakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical strakes*

bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR dengan *helical strakes* adalah 224,81 Ton/m dan nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR tanpa *helical strakes* adalah 282,86 Ton/m



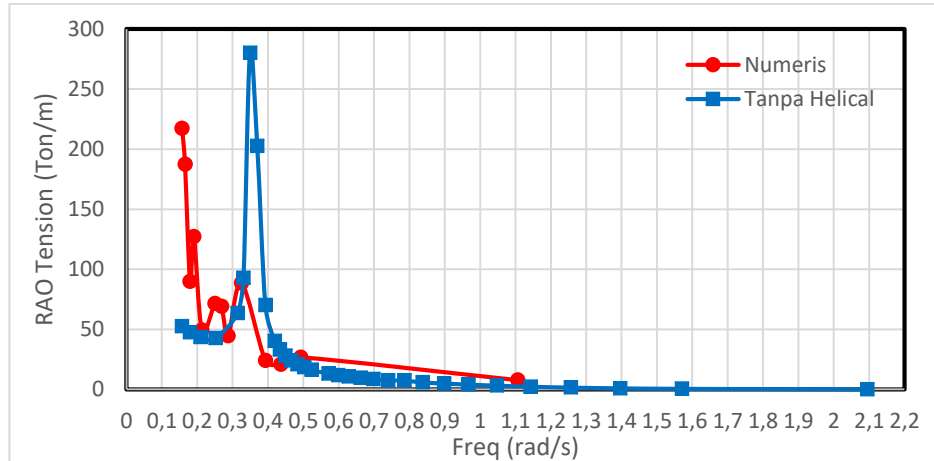
Gambar 4.57 RAO *tension* tali tambat II tertambat taut numeris



Gambar 4.58 RAO *tension* tali tambat III tertambat taut numeris

Perbandingan RAO tegangan SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat 3 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan *helical strakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical strakes* bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk

nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR dengan *helical strakes* adalah 213,299 Ton/m dan nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR tanpa *helical strakes* adalah 280,17 Ton/m



Gambar 4.59 RAO *tension* tali tambat IV tertambat taut numeris

Perbandingan RAO tegangan SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat 4 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan *helical strakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical strakes* bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR dengan *helical strakes* adalah 217,333 Ton/m dan nilai RAO tegangan tertinggi pada SPAR tanpa *helical strakes* adalah 280,87 Ton/m

Tabel 4.46 RAO *tension* maksimum tali tambat taut

	Helical		Tanpa Helical	
	Frekuensi (rad/s)	RAO Tension (Ton/m)	Frekuensi (rad/s)	RAO Tension (Ton/m)
Mooring Line I	0,1571	224,811	0,349	282,86
Mooring Line II	0,1571	224,811	0,349	282,87
Mooring Line III	0,1571	213,299	0,349	280,17
Mooring Line IV	0,1571	217,333	0,349	280,87

4.7.2 Metode Eksperimen

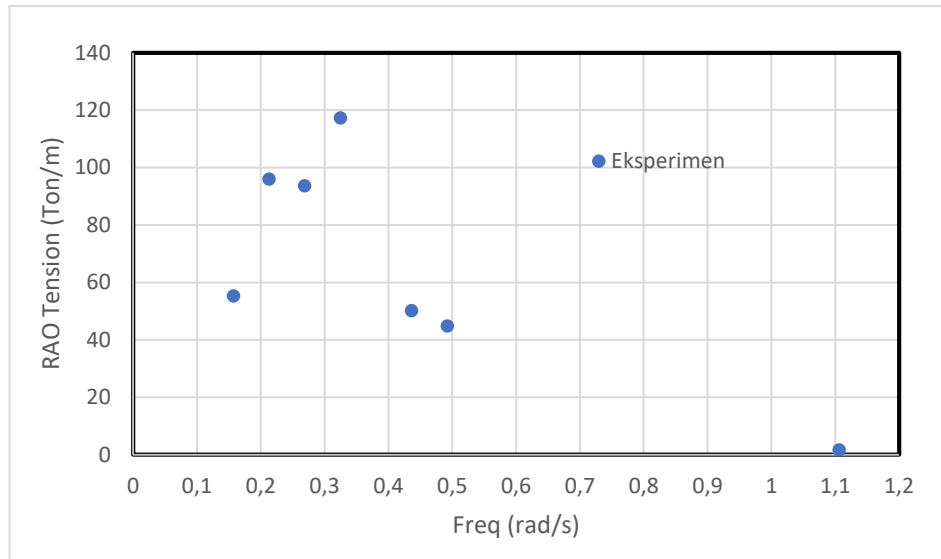
Pada pengujian eksperimen SPAR kondisi tertambat digunakan empat buah tali tambat yang di atur dengan panjang yang sama yaitu 1,96 m. Pengaturan tali tambat ini dalam kondisi tertambat *taut* atau tegang. Tali dihubungkan pada *load cell* yang berada pada jangkar di dalam kolam uji untuk mencatat tegangan tali yang terjadi. *Load cell* akan mencatat tegangan yang terjadi pada tali tambat per 0,5 detik. Hasil dari pencatatan dalam bentuk *time history* sehingga untuk mencari nilai dari suatu gerakan pada periode tertentu dilakukan dengan metode *fast fourier transform* dengan bantuan perangkat lunak MATLAB sama seperti ketika menganalisa data saat kondisi terapung bebas (*free floating*).

a. *Load cell I*

RAO *tension* pada *load cell I* dapat dicari dengan menganalisa tiap *time history* dengan metode *fast fourier transform*. Sehingga didapatkan nilai tegangan pada periode tertentu. Tabel 4.47 menunjukan tegangan tali tambat eksperimen pada setiap periode dan perbandingan antara periode respon dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.47 Data *load cell I*

No.	Kode	RAO Tegangan (Ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	55,224	3.60
2	TT1b	95,982	2.60
3	TT1c	93,571	2.10
4	TT1d	117,313	1.70
5	TT1e	50,149	1.30
6	TT1f	44,776	1.10
7	TT1g	1,658	0.50



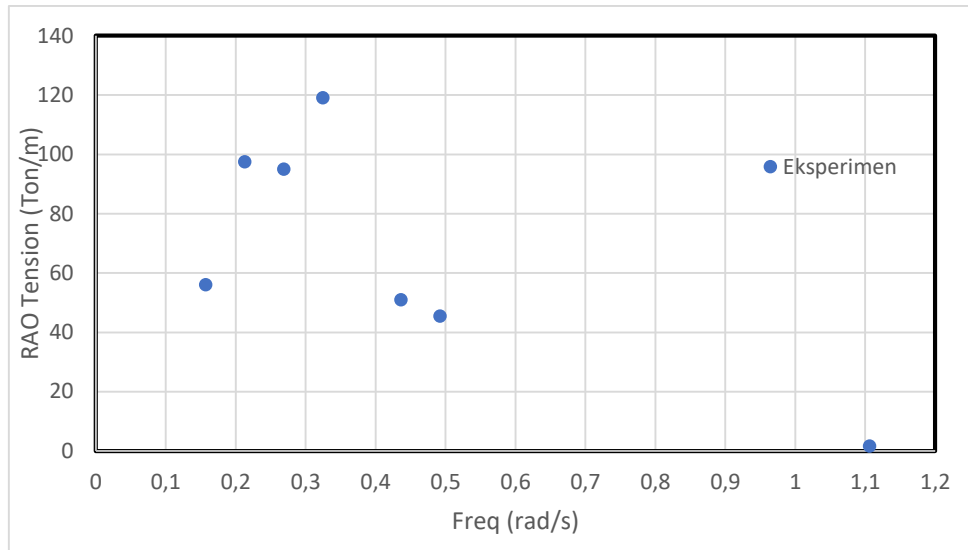
Gambar 4.60 RAO *tension* tali tambat I tertambat taut eksperimen

b. *Load cell II*

Tabel 4.48 menunjukkan RAO *tension* pada *load cell II* hasil eksperimen pada setiap periode dan perbandingan antara periode respon dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.48 Data *load cell II*

No.	Kode	RAO Tegangan (Ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	56,061	3.60
2	TT1b	97,436	2.60
3	TT1c	94,988	2.10
4	TT1d	119,091	1.70
5	TT1e	50,909	1.30
6	TT1f	45,455	1.10
7	TT1g	1,684	0.50



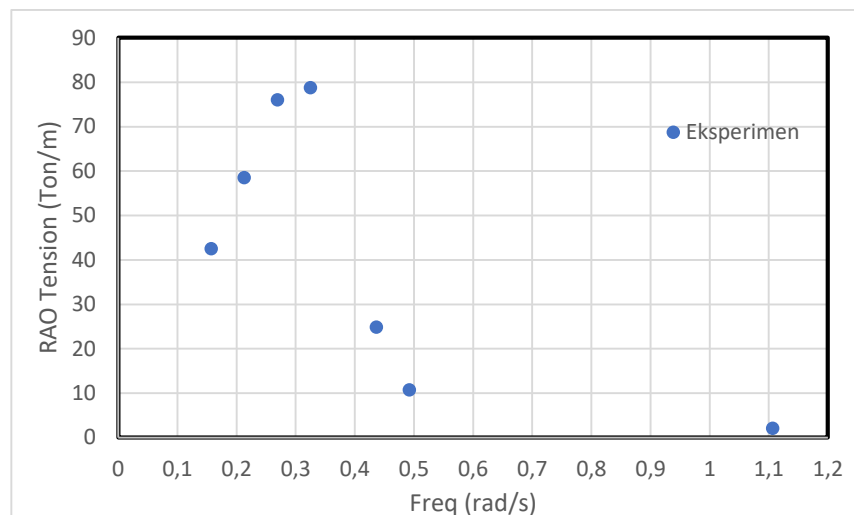
Gambar 4.61 RAO *tension* tali tambat II tertambat taut eksperimen

c. *Load cell III*

Tabel 4.49 menunjukkan RAO *tension* pada tali tambat *load cell III* di setiap periode dan perbandingan antara periode respon dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.49 Data *load cell III*

No.	Kode	RAO Tegangan (Ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	42,520	3.60
2	TT1b	58,493	2.60
3	TT1c	76,040	2.10
4	TT1d	78,740	1.70
5	TT1e	24,882	1.30
6	TT1f	10,709	1.10
7	TT1g	2,100	0.50



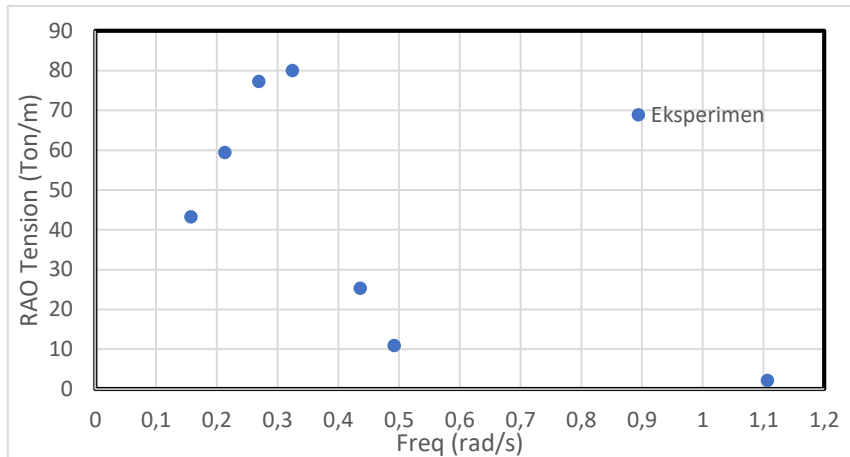
Gambar 4.62 RAO *tension* tali tambat III tertambat taut eksperimen

d. *Load cell IV*

RAO *tension* pada *load cell IV* ditunjukkan pada Tabel 4.50 yang merupakan tegangan tali tambat eksperimen pada setiap periode dan perbandingan antara periode respon dari hasil FFT (*fast fourier transform*) dengan periode gelombang.

Tabel 4.50 Data *load cell IV*

No.	Kode	RAO Tegangan (Ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	43,200	3.60
2	TT1b	59,429	2.60
3	TT1c	77,257	2.10
4	TT1d	80,000	1.70
5	TT1e	25,280	1.30
6	TT1f	10,880	1.10
7	TT1g	2,133	0.50



Gambar 4.63 RAO *tension* tali tambat IV tertambat taut eksperimen

4.7.3 Perbandingan RAO Tegangan Tali Metode Numeris dan Eksperimen

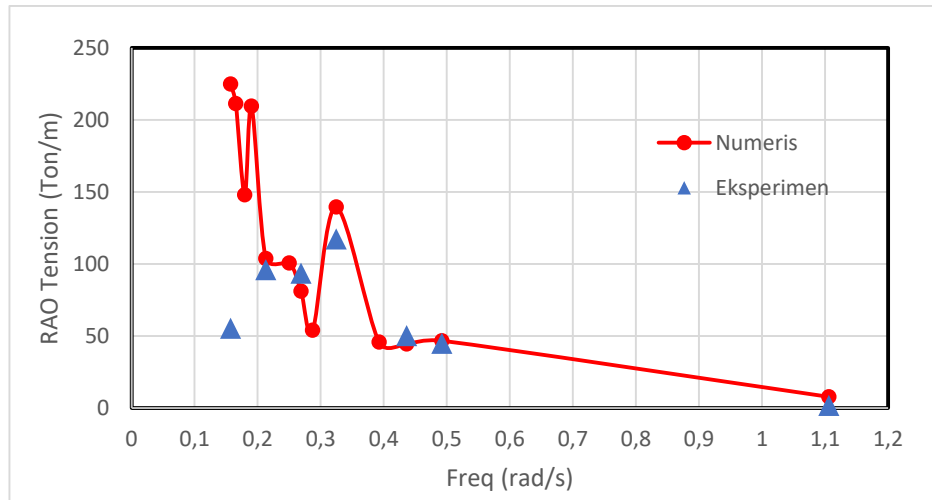
Perbandingan *respon amplitude operator* RAO tegangan metode numeris dan eksperimen dengan arah datang gelombang 0° . Perbandingan dilakukan pada setiap tali tambat. Gambar 4.60, 4.61, 4.62, 4.63 adalah gambar hasil perbandingan RAO tegangan pada tiap tali tambat.

a. Tali Tambat I

Perbandingan RAO tegangan tertinggi di tampilkan pada Tabel 4.43. pada Tali tambat 1, RAO tegangan tali tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda. Perbedaan akibat dari proses eksperimen yang dilakukan belum dapat menangkap respon yang sebenarnya, hal tersebut dikarenakan waktu yang kurang dalam menjalankan *wave maker* saat uji eksperimen. Waktu yang digunakan dalam membangkitkan gelombang hanya 10 detik oleh Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.

Tabel 4.51 RAO *tension* tertinggi taut metode numeris dan eksperimen

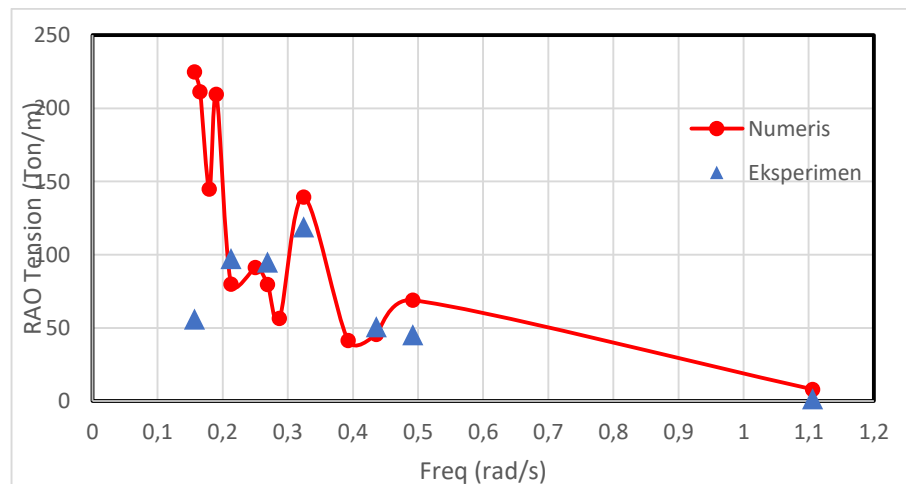
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (Ton/m)
Numerik	0.1571	224,811
Eksperimen	0.3246	117,313



Gambar 4.64 Perbandingan RAO tegangan tali tambat I metode numeris dan eksperimen

b. Tali Tambat II

Tabel 4.44 menampilkan perbandingan RAO tegangan tertinggi pada Tali tambat II, RAO tegangan tali tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukan posisi frekuensi natural yang berbeda. Perbedaan akibat dari proses eksperimen yang dilakukan belum dapat menangkap respon yang sebenarnya, hal tersebut dikarenakan waktu yang kurang dalam menjalankan *wave maker* saat uji eksperimen. Waktu yang digunakan dalam membangkitkan gelombang hanya 10 detik oleh Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.

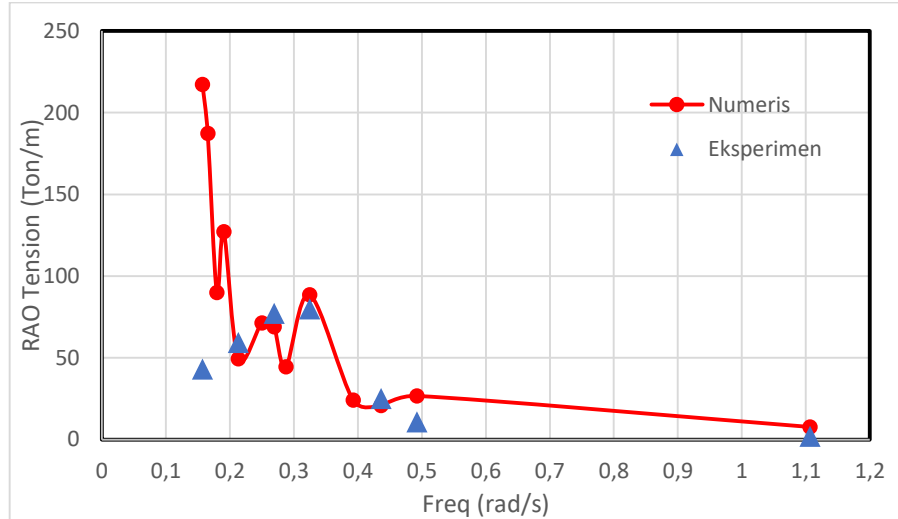


Gambar 4.65 Perbandingan RAO tegangan tali tambat II metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.52 RAO *tension* tertinggi taut metode numeris dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1571	224,811
Eksperimen	0.3246	119,091

c. Tali Tambat III



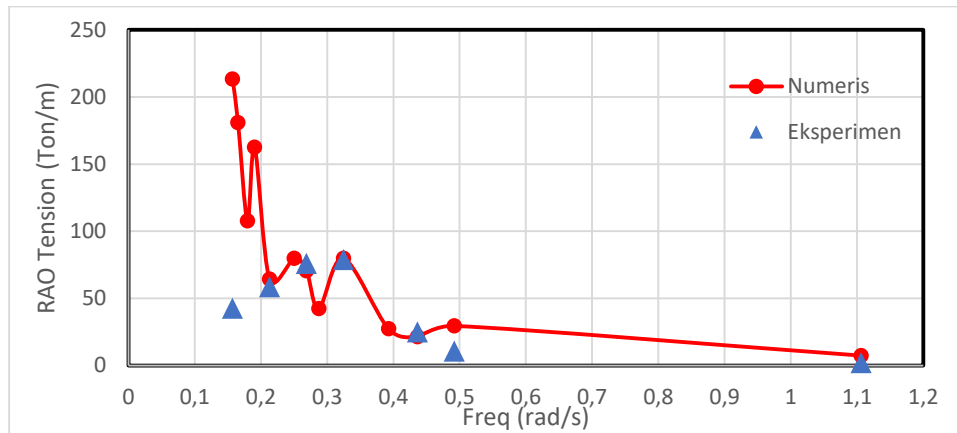
Gambar 4.66 Perbandingan RAO tegangan tali tambat III metode numeris dan eksperimen

Perbandingan RAO tegangan tertinggi di tampilkan pada Tabel 4.45. pada Tali tambat III, RAO tegangan tali tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda. Perbedaan akibat dari proses eksperimen yang dilakukan belum dapat menangkap respon yang sebenarnya, hal tersebut dikarenakan waktu yang digunakan dalam membangkitkan gelombang hanya 10 detik oleh Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.

Tabel 4.53 RAO *tension* tertinggi taut metode numeris dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1571	213,299
Eksperimen	0.3246	78,740

d. Tali Tambat IV



Gambar 4.67 Perbandingan RAO tegangan tali tambat IV metode numeris dan eksperimen

RAO tension pada Tali tambat IV tertinggi metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda Tabel 4.45. Perbedaan akibat dari proses eksperimen yang dilakukan belum dapat menangkap respon yang sebenarnya, hal tersebut dikarenakan dalam waktu yang kurang dalam menjalankan *wave maker* saat uji eksperimen. Waktu yang digunakan dalam membangkitkan gelombang hanya 10 detik oleh Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.

Tabel 4.54 RAO *tension* tertinggi taut metode numeris dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1571	217,333
Eksperimen	0.3246	80,000

4.8 VARIASI KONFIGURASI TALI TAMBAT

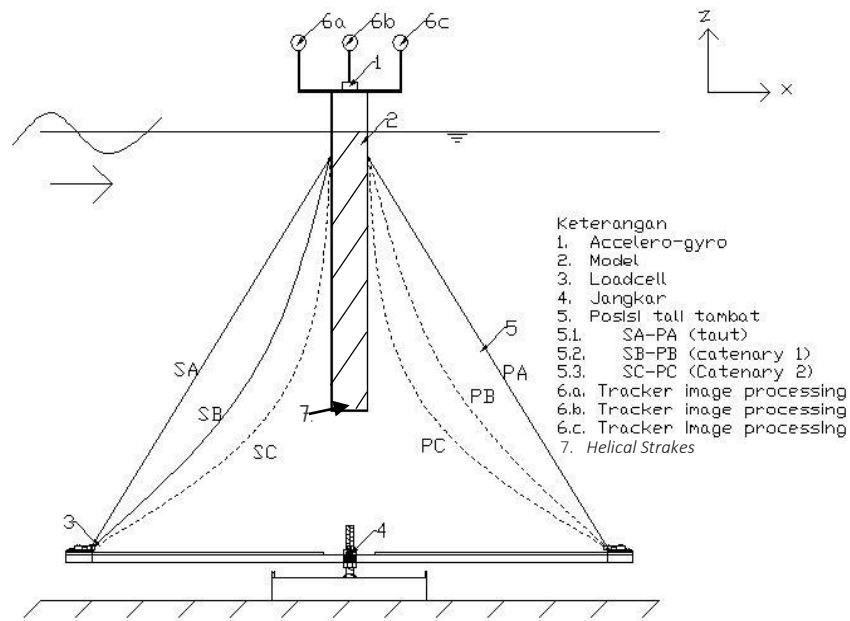
Variasi konfigurasi tali tambat pada tugas akhir ini adalah dengan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary*. Pada sistem tali tambat *catenary* digunakan dua variasi yaitu *catenary* 1 dengan panjang 246,5 m dan *catenary* 2 dengan panjang tali tambat 250 m. variasi ini disesuaikan dengan kondisi di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Pada variasi *catenary* 1 memiliki *pre-tension* 36 Ton dan *catenary* 2 memiliki *pre-tension* 18 Ton.

. Gambar 4.68 di bawah ini menggambarkan variasi konfigurasi tali yang akan dilakukan dan tabel 4.46. merupakan data-data dari variasi yang akan dilakukan. Hasil yang diharapkan dari analisa variasi konfigurasi tali ini adalah perbandingan dan efek dari penambahan panjang tali tambat terhadap perilaku gerak model SPAR dan tegangan tali tambat yang terjadi.

Tabel 4.55 Properties variasi konfigurasi tali

DESKRIPSI	PROTOTYPE SPAR (JIP,1995)		MODEL EKSPERIMEN	
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan
<u>Mooring System</u>				
Diameter tali	115	mm	0.62	mm
Kedalaman jangkar	225	m	180	cm
Posisi horizontal jangkar	122.3	m	98	cm
Kedalaman Posisi <i>Fairlead</i> (ditinjau dari <i>draft</i>)	12.74	m	10.2	cm
Panjang Tali <i>Taut</i>	245,5	m	1.96	m
Panjang Tali <i>Catenary</i> 1	246,5	m	1.975	m
Panjang Tali <i>Catenary</i> 2	250	m	2	m
Kekakuan <i>mooring</i> (EA)	1175	MN	603.814	N

Analisa konfigurasi tali dilakukan dengan metode numerik menggunakan bantuan perangkat lunak ANSYS AQWA. Dalam memperoleh nilai respon dan tegangan tali pada variasi konfigurasi tali tambat menggunakan analisa domain waktu. dan hasil *time series response* akan di lakukan FFT pada data *time series*. Pada analisa menggunakan metode eksperimen hanya dapat melakukan pengujian pada satu konfigurasi tali tambat, yaitu dengan konfigurasi tali rambat *catenary* 1 dan hanya ditinjau pada empat periode awal yang di rencanakan. Maka pada subbab ini akan membahas perbandingan antara metode numeris dan eksperimen variasi konfigurasi tali tambat *catenary* 1.



Gambar 4.68 Variasi konfigurasi tali yang dilakukan pada sistem tambat model SPAR

4.8.1 Perbandingan RAO *Catenary* 1 Numeris dan Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan membangkitkan *wave maker* yang selanjutnya gelombang hasil pembangkitan akan mengenai model SPAR. Model akan di uji dengan tujuh periode gelombang yang sesuai dengan data penskalaan. Pada eksperimen juga di berikan kode sebagai identitas untuk membedakan pengujian satu dengan yang lainnya.

Tabel 4.56 Karakteristik Gelombang Eksperimen Tertambat

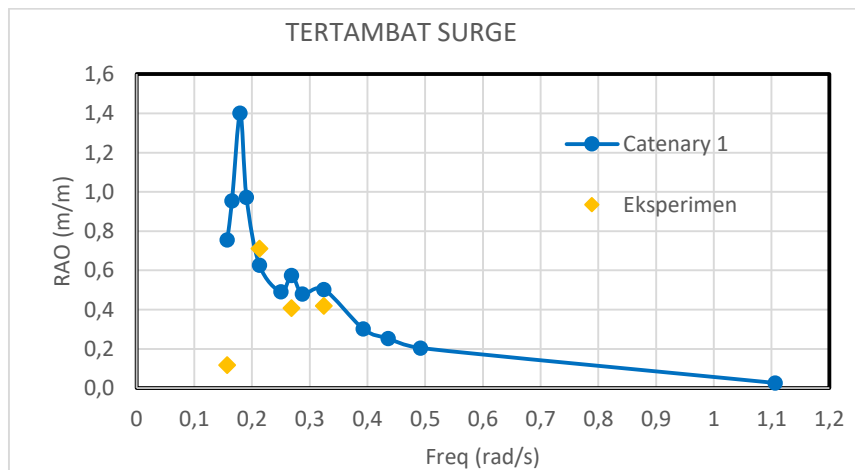
No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	TT4a	40	3.60	2.5
2	TT4b	29	2.60	
3	TT4c	23.5	2.10	
4	TT4d	19	1.70	

Eksperimen dilakukan dengan *set-up* tali tambat yang panjang talinya diatur sesuai dengan hasil pensklalaan dan proses selanjutnya sama seperti metode eksperimen yang dilakukan sebelumnya. Hanya saja pada eksperimen dengan konfigurasi tali tambat *catenary* 1 ditinjau hanya empat periode gelombang. Tabel 4.48 memberikan data RAO hasil eksperimen.

Tabel 4.57 RAO konfigurasi *catenary mooring* 1 metode eksperimen

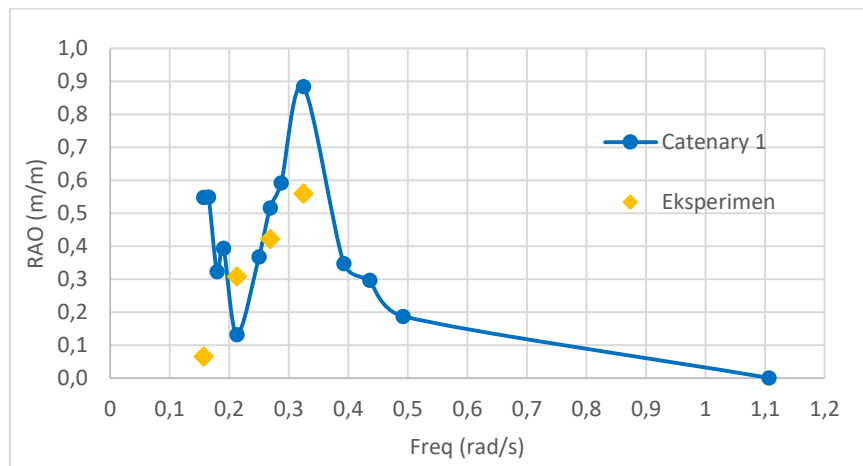
No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	RAO Gerakan Surge (m/m)	RAO Gerakan Heave (m/m)	RAO Gerakan Pitch (deg/m)
1	TT4a	3,6	0,1175	0,0665	0,01414
2	TT4b	2,6	0,7124	0,3092	0,2441
3	TT4c	2,1	0,4084	0,4223	0,14061
4	TT4d	1,7	0,4200	0,5606	0,19295

Perbandingan dilakukan pada metode numeris dan eksperimen. Gambar 4.69, 4.70, 4.71 merupakan perbandingan RAO secara numeris dan eksperimen konfigurasi tali tambat *Catenary* 1 mode gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch*.



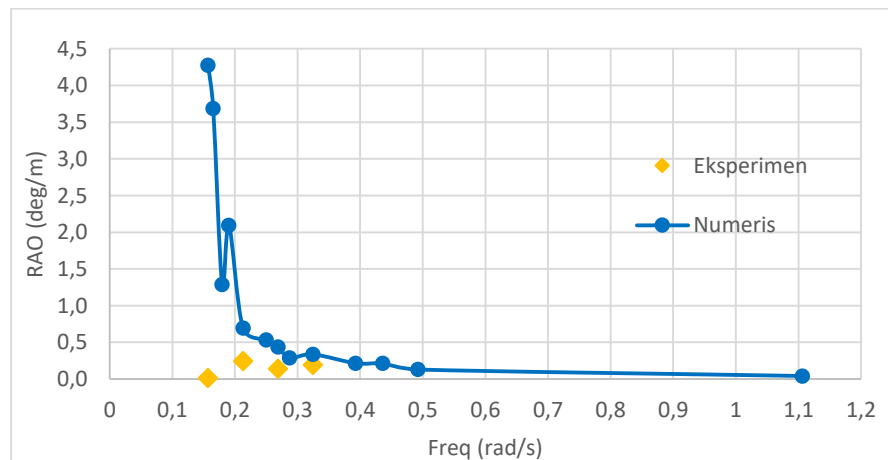
Gambar 4.69 Perbandingan RAO *surge catenary* 1 metode numeris dan metode eksperimen.

RAO gerakan *surge* tertambat *catenary* 1 metode numeris pada penelitian ini memiliki nilai RAO tertinggi sebesar 1,241 m/m pada frekuensi 0,1904 rad/s. Metode eksperimen nilai RAO terbesar adalah 0,71 m/m pada frekuensi 0,2129 rad/s.



Gambar 4.70 Perbandingan RAO *heave* catenary 1 metode numeris dan metode eksperimen.

RAO gerakan *heave* tertambat *catenary* 1 memiliki nilai RAO tertinggi tepat pada frekuensi alami SPAR, yaitu pada 0.3245 rad/s. Nilai RAO tertinggi dengan metode numeris adalah 0,884 m/m dan metode eksperimen sebesar 0,661 m/m.



Gambar 4.71 Perbandingan RAO *pitch* catenary 1 metode numeris dan metode eksperimen.

RAO gerakan *pitch* tertambat *catenary* 1 metode numeris pada penelitian ini memiliki nilai RAO tertinggi sebesar 4,604 deg/m pada frekuensi 0.1570 rad/s. Metode eksperimen nilai RAO terbesar adalah 0,244 deg/m pada frekuensi 0.2129 rad/s. Pada *low frequency* dengan metode eksperimen hasilnya jauh lebih kecil. Hal ini karena pada saat eksperimen pada *low frequency* gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker* terbatas.

Tabel 4.49 menyajikan nilai RAO tertambat *catenary* 1 tertinggi pada metode numeris dan eksperimen pada tiap frekuensinya.

Tabel 4.58 RAO tertinggi konfigurasi *catenary* 1 metode numeris dan metode eksperimen

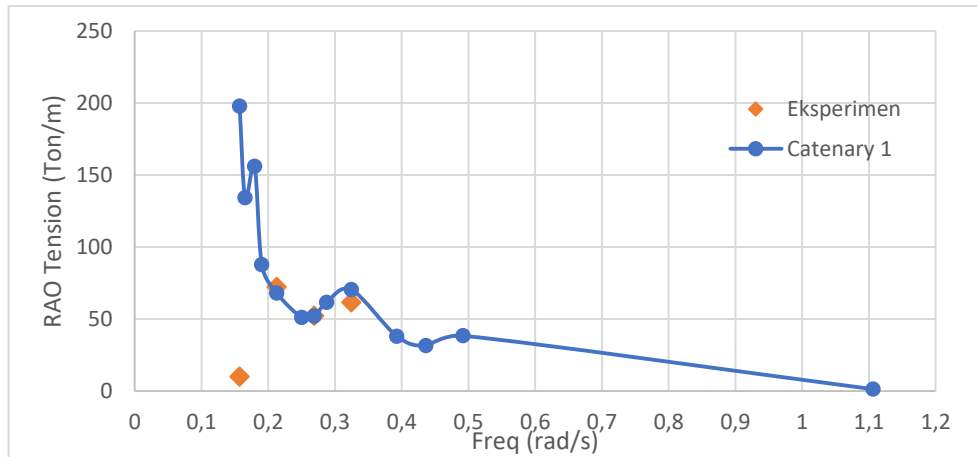
Mode	Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO	Satuan
<i>Surge</i>	Numeris	0,1904	1,241	m/m
	Eksperimen	0,2129	0,71	m/m
<i>Heave</i>	Numeris	0,3246	0,884	m/m
	Eksperimen	0,3246	0,661	m/m
<i>Pitch</i>	Numeris	0,1571	4,604	deg/m
	Eksperimen	0,2129	0,244	deg/m

4.8.2 Perbandingan RAO Tegangan *Catenary* 1 Numeris dan Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan *set-up* tali tambat yang panjang talinya diatur sesuai dengan hasil pensklalaan dan proses selanjutnya sama seperti metode eksperimen yang dilakukan sebelumnya. Hanya saja pada eksperimen dengan konfigurasi tali tambat *catenary* 1 ditinjau hanya empat periode gelombang. Tegangan tali yang di ukur menggunakan instrumen *load cell* pada kondisi *catenary* 1. Tabel 4.50 memberikan data RAO tegangan hasil eksperimen.

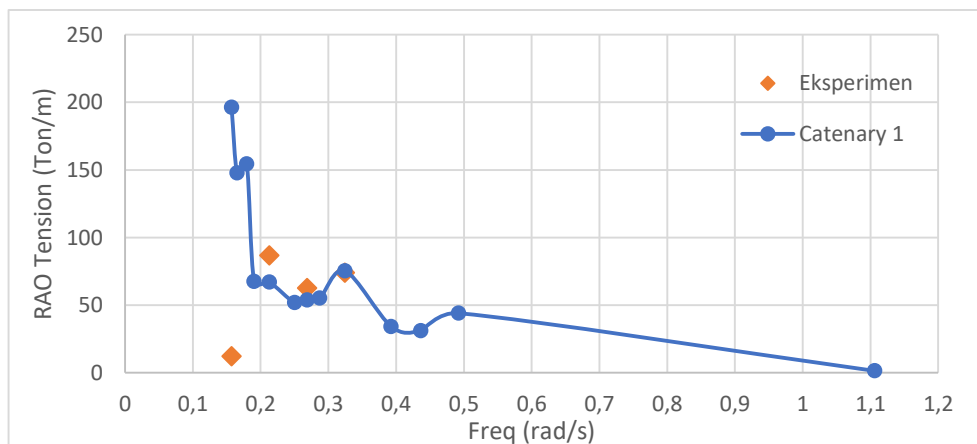
Tabel 4.59 RAO SPAR *catenary mooring* 1 metode eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	RAO Tegangan (Ton/m)	RAO Tegangan (Ton/m)	RAO Tegangan (Ton/m)	RAO Tegangan (Ton/m)
1	TT4a	3,6	0,1175	0,0665	0,01414	0,01414
2	TT4b	2,6	0,7124	0,3092	0,2441	0,2441
3	TT4c	2,1	0,4084	0,4223	0,14061	0,14061
4	TT4d	1,7	0,4200	0,5606	0,19295	0,19295

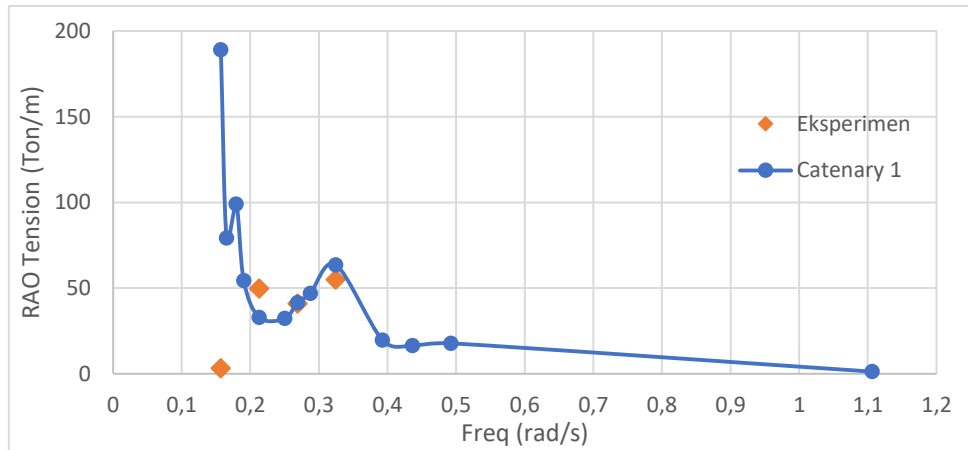


Gambar 4.72 Perbandingan RAO tegangan tali tambat I *catenary* 1

RAO tegangan tali tambat 1 dan 2 *catenary* 1 memiliki nilai yang hampir sama dan bentuk tren RAO tegangan yang sama. Hal ini diakibatkan karena bentuk yang simetris antara tali tambat 1 dan tali tambat 2. Nilai RAO tegangan tertinggi dengan metode numeris adalah 197,708 Ton/m pada tali tambat 1 dan 196,278 Ton/m untuk tali tambat 2. Sedangkan pada metode eksperimen nilai RAO tegangan tertinggi adalah 72,250 Ton/m untuk tali tambat 1 dan 86,700 Ton/m untuk tali tambat 2 dengan frekuensi gelombang yang sama, yaitu 0.3246 rad/s.

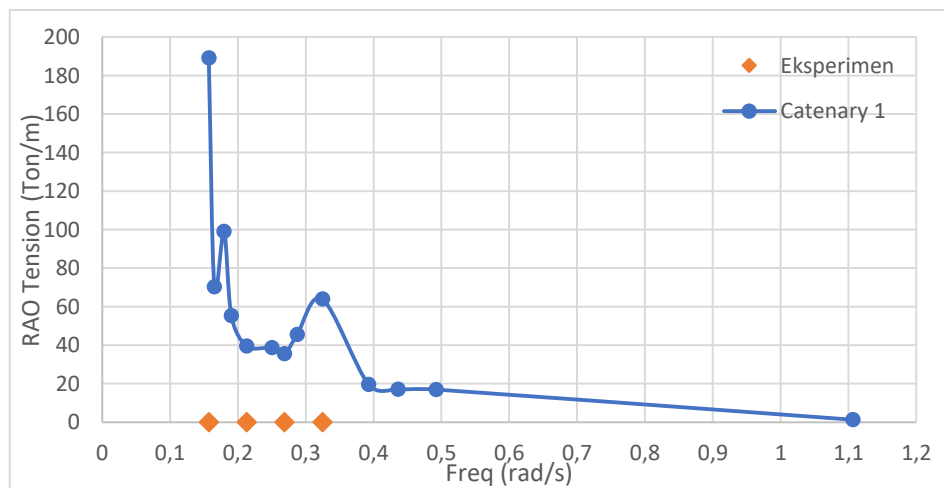


Gambar 4.73 Perbandingan RAO tegangan tali tambat II *catenary* 1



Gambar 4.74 Perbandingan RAO tegangan tali tambat III *catenary* 1

RAO tegangan tali tambat 3 dan 4 memiliki nilai yang hampir sama dan bentuk tren RAO tegangan yang sama. Hal ini diakibatkan karena bentuk yang simetris antara tali tambat 3 dan tali tambat 4. Nilai RAO tegangan tertinggi dengan metode numeris adalah 188,947 Ton/m untuk tali tambat 3 dan 189,067 Ton/m untuk tali tambat 4. Sedangkan pada metode eksperimen nilai RAO tegangan tertinggi adalah 49,636 Ton/m untuk tali tambat 3 dengan frekuensi 0.3246 rad/s dan untuk tali tambat 4 tidak memiliki nilai karena terjadi kerusakan pada *load cell*.



Gambar 4.75 Perbandingan RAO tegangan tali tambat IV *catenary* 1

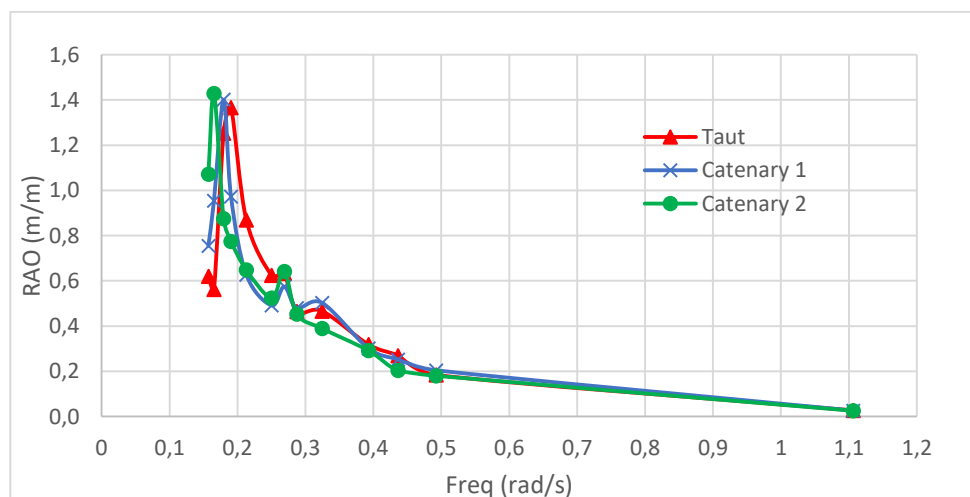
Tabel 4.51 menyajikan nilai RAO tegangan tertambat *catenary* 1 tertinggi pada metode numeris dan eksperimen pada tiap frekuensinya.

Tabel 4.60 RAO tegangan tertinggi *catenary* 1 metode numeris dan metode eksperimen

Mode	Metode	Frekuensi (rad/s)	Tegangan (Ton/m)
Line 1	Numeris	0,1571	197,708
	Eksperimen	0,3246	72,250
Line 2	Numeris	0,1571	196,278
	Eksperimen	0,3246	86,700
Line 3	Numeris	0,1571	188,947
	Eksperimen	0,3246	49,636
Line 4	Numeris	0,1571	189,067
	Eksperimen	0,3246	0

4.8.3 Perbandingan RAO Tertambat Konfigurasi Tali

Perbandingan konfigurasi tali tambat menggunakan bantuan perangkat lunak ANSYS AQWA. RAO gerakan dianalisa menggunakan domain waktu. Sehingga respon SPAR yang ditinjau pada tiga derajat kebebasan *surge*, *heave*, dan *pitch* adalah pada Gambar 4.76, 4.77, 4.78.



Gambar 4.76 RAO *surge* variasi konfigurasi tali tambat

Perbandingan RAO gerakan *surge* variasi konfigurasi tali tambat *taut*, *catenary* 1 dan *catenary* 2 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO terbesar SPAR dengan

konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary* 1 memiliki frekuensi dengan nilai RAO terbesar 0,1904 rad/s sedangkan pada konfigurasi tali tambat *catenary* 2 bergeser ke frekuensi yang lebih rendah, yaitu 0,1795 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tertinggi pada variasi konfigurasi tali tambat *taut* memiliki nilai 1.367 m/m, *catenary* 1 memiliki nilai RAO tertinggi 1,241 m/m, dan *catenary* 2 memiliki nilai RAO tertinggi 1,428 m/m.

Variasi konfigurasi tali tambat pada gerakan *surge* mengakibatkan bertambahnya nilai RAO tertinggi beriringan dengan bertambahnya panjang tali tambat. Frekuensinya pun berubah ke frekuensi yang lebih rendah sesuai dengan grafik RAO pada gambar 4.76.

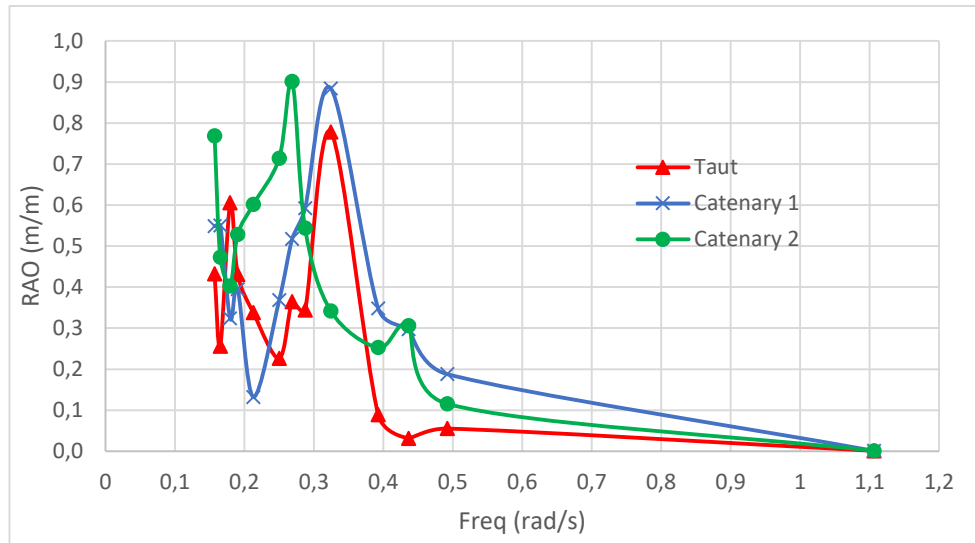
Tabel 4.61 Perbandingan Hasil RAO

Mode	Variasi Konfigurasi Tali	Frekuensi (rad/s)	RAO (m/m)
<i>Surge</i>	Taut	0,1904	1,367
	Catenary 1	0,1904	1,401
	Catenary 2	0,1795	1,428

Perbandingan RAO gerakan *heave* variasi konfigurasi tali tambat *taut*, *catenary* 1 dan *catenary* 2 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO terbesar SPAR dengan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary* 1 memiliki frekuensi dengan nilai RAO terbesar 0,3246 rad/s sedangkan pada konfigurasi tali tambat *catenary* 2 bergeser ke frekuensi yang lebih rendah, yaitu 0,2688 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tertinggi pada variasi konfigurasi tali tambat *taut* memiliki nilai 0,778 m/m, *catenary* 1 memiliki nilai RAO tertinggi 0,884 m/m, dan *catenary* 2 memiliki nilai RAO tertinggi 0,901 m/m.

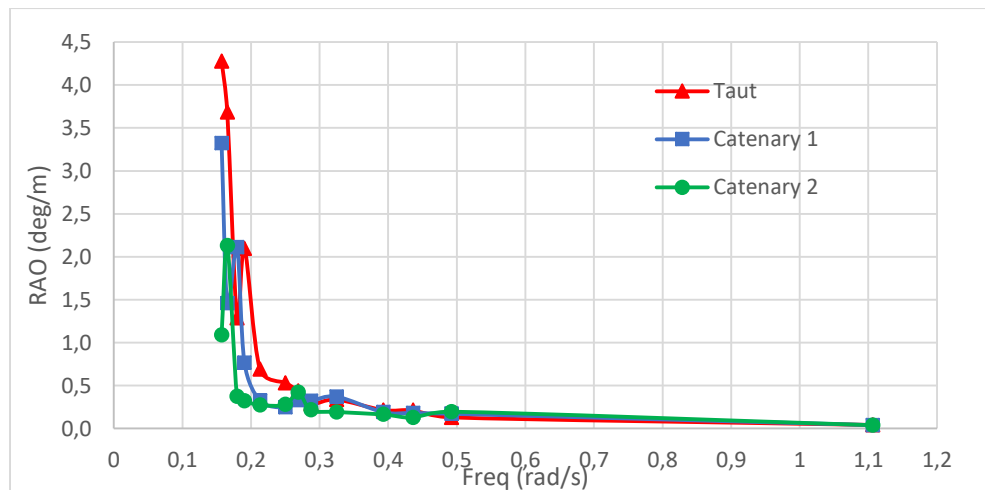
Tabel 4.62 Perbandingan Hasil RAO

Mode	Variasi Konfigurasi Tali	Frekuensi (rad/s)	RAO (m/m)
<i>Heave</i>	Taut	0,3246	0,778
	Catenary 1	0,3246	0,884
	Catenary 2	0,2688	0,901



Gambar 4.77 RAO *heave* variasi konfigurasi tali tambat

Variasi konfigurasi tali tambat pada gerakan *heave* mengakibatkan bertambahnya nilai RAO tertinggi beriringan dengan bertambahnya panjang tali tambat. Frekuensinya pun berubah ke frekuensi yang lebih rendah sesuai dengan grafik RAO pada gambar 4.77.



Gambar 4.78 RAO *pitch* variasi konfigurasi tali tambat

RAO gerakan *pitch* variasi konfigurasi tali tambat *taut*, *catenary* 1 dan *catenary* 2 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO terbesar SPAR dengan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary* 1 memiliki frekuensi dengan nilai RAO terbesar 0,1571

rad/s sedangkan pada konfigurasi tali tambat *catenary* 2 bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,1653 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tertinggi pada variasi konfigurasi tali tambat *taut* memiliki nilai 4,276 deg/m, *catenary* 1 memiliki nilai RAO tertinggi 3,324 deg/m, dan *catenary* 2 memiliki nilai RAO tertinggi 2,128 deg/m.

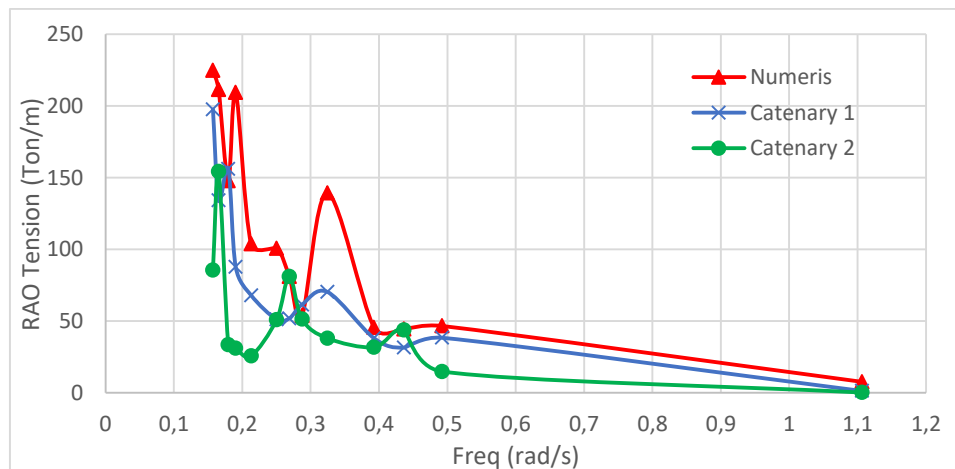
Variasi konfigurasi tali tambat pada gerakan *pitch* mengakibatkan berkurangnya nilai RAO tertinggi beriringan dengan bertambahnya panjang tali tambat. Frekuensinya pun berubah ke frekuensi yang lebih rendah sesuai dengan grafik RAO pada gambar 4.78.

Tabel 4.63 Respon Struktur Konfigurasi Tali Tambat

Mode	Variasi Konfigurasi Tali	Frekuensi (rad/s)	Respon
<i>Pitch</i>	Taut	0,1571	4,276
	Catenary 1	0,1571	3,324
	Catenary 2	0,1653	2,128

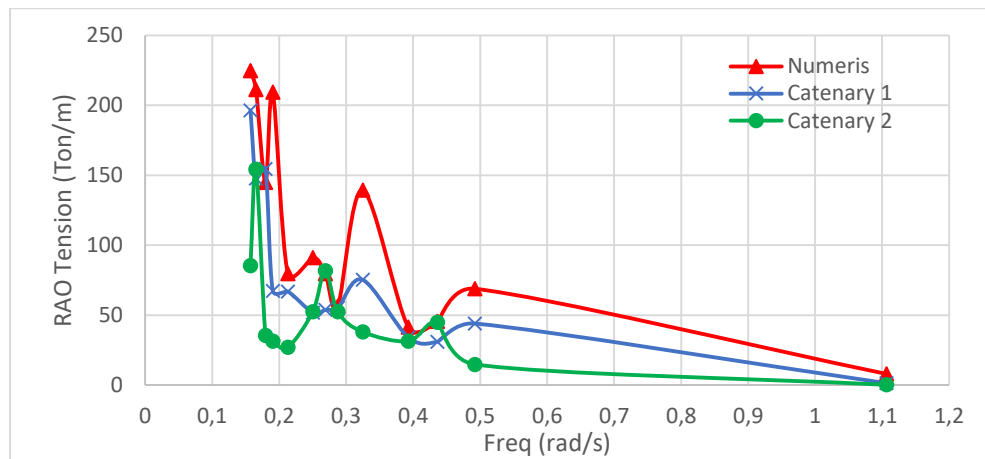
4.8.4 Perbandingan RAO Tegangan Konfigurasi Tali

Perbandingan konfigurasi tali tambat menggunakan bantuan perangkat lunak ANSYS AQWA. RAO tegangan dianalisa menggunakan domain waktu. Sehingga respon SPAR yang ditinjau pada tiga derajat kebebasan *surge*, *heave*, dan *pitch* adalah pada Gambar 4.79, 4.80, 4.81, dan 4.82.



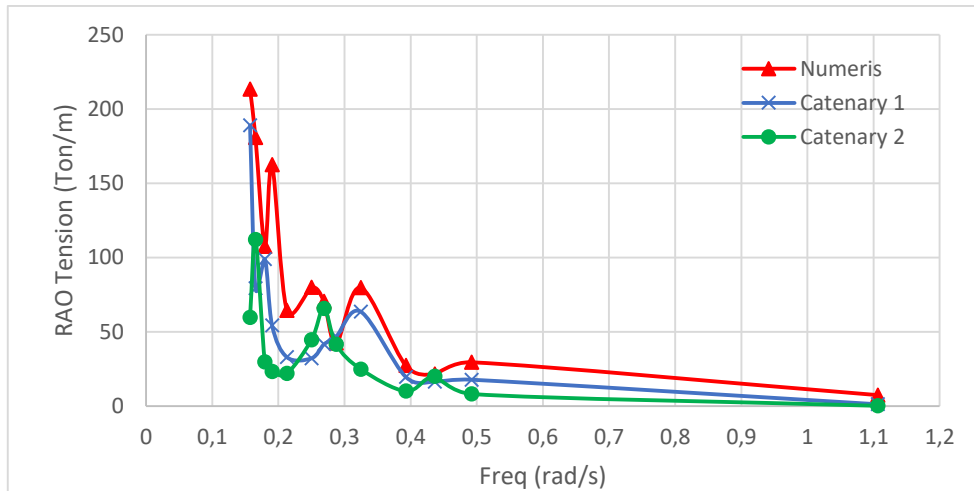
Gambar 4.79 Perbandingan RAO tegangan tali tambat I variasi konfigurasi tali

Perbandingan RAO tegangan variasi konfigurasi tali tambat *taut* tali tambat I, *catenary* 1 dan *catenary* 2 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary* 1 memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada konfigurasi tali tambat dan *catenary* 2 bergeser ke frekuensi yang lebih rendah, yaitu 0,1653 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tegangan tertinggi pada variasi konfigurasi tali tambat *taut* memiliki nilai 224.81 Ton/m, *catenary* 1 memiliki nilai RAO tertinggi 197,71 Ton/m, dan *catenary* 2 memiliki nilai RAO tertinggi 154,30 Ton/m.



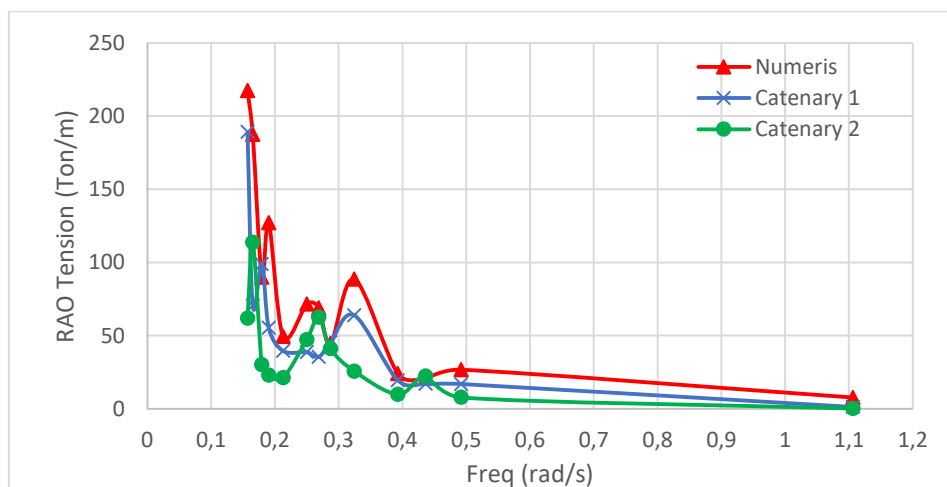
Gambar 4.80 Perbandingan RAO tegangan tali tambat II variasi konfigurasi tali

Perbandingan RAO tegangan variasi konfigurasi tali tambat *taut* tali tambat II, *catenary* 1 dan *catenary* 2 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary* 1 memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s. sedangkan pada konfigurasi tali tambat dan *catenary* 2 bergeser ke frekuensi yang lebih rendah, yaitu 0,1653 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tegangan tertinggi pada variasi konfigurasi tali tambat *taut* memiliki nilai 224.81 Ton/m, *catenary* 1 memiliki nilai RAO tertinggi 196,28 Ton/m, dan *catenary* 2 memiliki nilai RAO tertinggi 154,30 Ton/m.



Gambar 4.81 Perbandingan RAO tegangan tali tambat III variasi konfigurasi tali

Perbandingan RAO tegangan variasi konfigurasi tali tambat *taut* tali tambat III, *catenary 1* dan *catenary 2* pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary 1* memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada konfigurasi tali tambat dan *catenary 2* bergeser ke frekuensi yang lebih rendah, yaitu 0,1653 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tegangan tertinggi pada variasi konfigurasi tali tambat *taut* memiliki nilai 213.30 Ton/m, *catenary 1* memiliki nilai RAO tertinggi 188,95 Ton/m, dan *catenary 2* memiliki nilai RAO tertinggi 111.96 Ton/m.



Gambar 4.82 Perbandingan RAO tegangan tali tambat IV variasi konfigurasi tali

Perbandingan RAO tegangan variasi konfigurasi tali tambat *taut* tali tambat IV, *catenary* 1 dan *catenary* 2 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO tegangan terbesar SPAR dengan konfigurasi tali tambat *taut* dan *catenary* 1 memiliki frekuensi dengan nilai RAO tegangan tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO tegangan tertinggi pada variasi konfigurasi tali tambat *taut* memiliki nilai 217,33 Ton/m, *catenary* 1 memiliki nilai RAO tertinggi 189,07 Ton/m, dan *catenary* 2 memiliki nilai RAO tertinggi 113.72 Ton/m.

Tabel 4.64 RAO Tegangan Tertinggi Tali Metode Numeris *Taut*, *Catenary* 1, dan *Catenary* 2

Mode	Variasi Konfigurasi Tali	Frekuensi (rad/s)	Tegangan (Ton/m)
<i>Line 1</i>	Taut	0,1571	224.81
	Catenary 1	0,1571	197,71
	Catenary 2	0,1653	154,30
<i>Line 2</i>	Taut	0,1571	224.81
	Catenary 1	0,1571	196,28
	Catenary 2	0,1653	154,30
<i>Line 3</i>	Taut	0,1571	213.30
	Catenary 1	0,1571	188,95
	Catenary 2	0,1653	111.96
<i>Line 4</i>	Taut	0,1571	217,33
	Catenary 1	0,1571	189,07
	Catenary 2	0,1653	113.72

RAO SPAR pada konfigurasi *taut mooring* memiliki gerak yang lebih kecil dari pada *catenary mooring*. Tegangan tali pada konfigurasi tali *taut* memiliki tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan tegangan tali pada konfigurasi *catenary mooring*. Meskipun gerakan pada konfigurasi *catenary mooring* lebih besar tetapi tegangan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan konfigurasi *taut*, hal tersebut karena pengaruh *pre-tension* yang berbeda.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan dan hasil analisis studi numeris dan eksperimen SPAR *helical strakes* dengan variasi konfigurasi tali tambat, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. *Response amplitude operator* (RAO) terapung bebas SPAR *helical strakes* dengan metode numeris memiliki nilai RAO tertinggi yang lebih besar dari eksperimen.
2. Respon amplitudo operator (RAO) tertambat dengan metode numeris memiliki nilai RAO tertinggi yang lebih besar dari eksperimen. Respon gerak SPAR pada konfigurasi *taut mooring* memiliki gerak yang lebih kecil dari pada *catenary mooring*.
3. Tegangan tali pada konfigurasi tali *taut* memiliki tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan tegangan tali pada konfigurasi *catenary mooring*. Meskipun gerakan pada konfigurasi *catenary mooring* lebih besar, tetapi tegangan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan konfigurasi *taut*. Hal tersebut karena pengaruh *pre-tension* yang berbeda.

5.2 SARAN

Saran dapat diberikan yang bersifat membangun untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan *wave probe* untuk memvalidasi gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker*.
2. Pembangkitan gelombang sebaiknya secara terus menerus untuk mendapatkan respon gerak yang sesuai.
3. Penambahan *Heave Plate* pada SPAR.
4. Uji eksperimen dilakukan berulang minimal 2 kali untuk memvalidasi respon gerak struktur SPAR.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Akhbar, B., 2015, “ Studi Komparasi Gerak Spar dengan Variasi Plate dan Sistem Tambat”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Agarwal, A., & Jain, A. (2003). Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves. *Ocean Engineering*, 487-516.
- Anastasia, 2009, “Analisa Numeris Sistem Tambat Spar antara Catenary Mooring dan Taut Mooring System Akibat Beban Gelombang”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamic of Marine Vehicles*. USA: John Wiley & Sons.
- Chakrabarti, S. (1994). *Offshore Structure Modeling*. Plainfield: World Scientific.
- Chakrabarti, S. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Plainfield: Elsevier.
- Deep Oil Technology Inc. (1995). *Spar Model Test Joint Industry Project*. California: Deep Oil Technology Inc.
- Diaz. N. (2017). *Studi Analitis, Numerik dan Eksperimen Olah Gerak Struktur SPAR dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat Tipe Taut pada Kondisi Kegagalan Tali Tambat*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Dinaryo, M., 2016, “ Studi Operabilitas Spar Platform Tipe Truss di Selat Makasar dengan Sistem Tambat Taut”, Thesis Master, Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok.
- Ding, Q. Li, C. Li, B. Et al. (2017). *Research on the Influence of Helical Strakes and Its Parameters on Dynamic Response of Platform of Floating Wind Turbine Based on Optimization Method of Orthogonal Design* : American Society of Mechanical Engineers, Vol. 139 / 051002-3
- Djarmiko, E. B. (1992). *Hydro-structural studies on swath type vessel*. Glasgow: Glasgow Theses Service.
- Djarmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITSpress.

- Fiddini, D. (2017). “Analisa Time-Domain Pengaruh Spread Mooring dengan Variasi Jumlah Line Terhadap Gerakan FPU dan Tegangan Flexible Riser”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Gianville, R. S., Deep Oil Technology Inc, Pauling, J. R., & Halkyard, J. E. (1991). Analysis of the Spar Floating Drilling Production and Storage Structure. *OTC 6701* (pp. 57-68). Houston, Texas: Offshore Technology Conference.
- Halkyard, J. (2012). *Spar Floating Drilling Production, and Storage System : History and Evolution*. Virginia : American Society of Civil Engineers.
- Irani, B. Mehernosh, Thomas Rouckout, and P. Robert Johnson. 2000. “Dynamics of a Spar Platform .” *Proceedings of the Tenth (2000) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Seattle: The International Society of Offshore and Polar Engineers. 261-268.
- Islam, A. S., Jameel, M., & Jumaat, M. (2011). Review of offshore energy in Malaysia and floating Spar *platform* for sustainable exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6268-6284.
- Jaelani, A. (2008). *Kajian Eksperimental Perbandingan Pengaruh Sistem Tambat Taut dan Catenary Terhadap Gerakan Spar Tipe Klasik Akibat Beban Gelombang*. Surabaya: ITS.
- Karimiad, 2011, “Stochastic Dynamic Response Analysis of Spar-Type Wind Turbine with Catenary or Taut Mooring Systems”, Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor, Trondheim : NTNU
- Kim, M. (2012). *Hull/Mooring/Riser Coupled Spar Motion Analysis: Sensitivity against Methodological/Environmental/Empirical Parameters*. Virginia : American Society of Civil Engineers
- Mekha, BB, and JM Rosset. 1998. “Statistical response of spar platform to irregular waves.” *ASME Confrence*. OMAE98-0605.
- Montasir, O. A., Anurag, Y., & Kurian, V. J. (2016). Effect of Mooring Line Pretensions on the Dynamic Response of Truss Spar Platforms. *Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. 1061-1066). Rhodes,Greece: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).

- Nestegård, Arne, Marit Ronæss, Geir Skeie, Joar Dalheim, and Torgeir Vada. 2003. "Numerical Models for SPAR Platform Dynamics." *Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers. 167-174.
- Niedzwecki, J., Lindt, J., Gage, J., & Teigen, P. (2000). Design estimates of surface wave interaction with compliant deepwater platforms. *Ocean Engineering*, 27, 867-888.
- Rachmadiarto, F., 2008 " Analisa Numerik Respon Dinamis Spar Buoy", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Seebai, T., & Sundaravadivelu, R. (2009). Effect of Taut and Catenary Mooring on Spar Platform with 5MW Wind Turbine. *Proceedings of The Eighth (2009) ISOPE Ocean Mining Symposium* (pp. 52-58). Chennai, India: The International Society of Offshore.
- Sudhakar, S., & Nallayarasu, S. (2011). Influence of Heave Plate On Hydrodynamic Response of SPAR. *30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2011*. Rotterdam: ASME.
- Syukay, W. (2012). *Taut Leg Mooring System and Anchoring for SPAR*. Virginia : American Society of Civil Engineers
- Tang, Y.-g., Zhang, S.-x., Zhang, R.-y., & Liu, H.-x. (2007). Development of study on the dynamic characteristic of deep water mooring system. *Journal of Marine Science and Application*, 17-23.
- Yanuar. I. (2017). *Studi analitis, numeris dan eksperimen olah gerak serta dinamika tegangan sistem tambat model SPAR tipe klasik dalam kondisi free floating dan tertambat dengan variasi konfigurasi mooring* , Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN A

TABULASI DISTRIBUSI MASSA (TITIK BERAT DAN GIRASI)

Data Spar		
ID	12.80000256	cm
OD	14.00000256	cm
Draft	108.0076406	cm
Length	123.3676437	cm
Fairlead Depth	10.19124013	cm
Length	40	cm
Width	40	cm
Height	15.65257456	cm
Depth A	731.4287177	cm
Depth B	182.8571794	cm
KG	49.61768611	cm
Pitch Radius	49.17639079	cm
Roll Radius	49.17639079	cm

Perhitungan Model

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.489876
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.089876
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.089876
	Ballast 4	1	663.5899	1	663.5898755
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1	2096.689876
	Ballast 2	0.8	465.9899	1	465.9898755
	Ballast 3	0.5	179.4899	1	179.4898755
Topside		0.3	599.5	1	599.5
Tambahan	Ulir		352.0899	1	352.0898755
	Pipa	-	4087.53	1	4087.529853
	Penyambung	-		1	0
	Helical Stakes		96.64	3	289.92
	Mur	-		2	0
Total					14127.93

Perhitungan VCG

1. Blok A

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ballast 1	2	6.8	1628.49	11073.73115
Ballast 2	2	4.8	1623.09	7790.831403
Ballast 4	1	3.3	2094.09	6910.496589
Ballast 3	2.5	1.6	663.5899	1028.564307
Cap	0.3	0.2	47.46424	7.119635947
Total			6056.724	26810.74309

$$\text{VCG Blok A} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 4.426608 \text{ cm dari keel}$$

3. Tambahan

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ulir (130 cm)	-	65.3	352.0899	22991.46887
Pipa	-	61.7	4087.53	252200.5919
Helical 1	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 2	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 3	-	54.0	96.64	5218.54397
Topside	0.3	123.55	599.5	74068.225
Total			5329.039	364915.9177

$$\text{VCG tambahan} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 68.47687 \text{ cm dari keel}$$

4. Total

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa	Momen
Blok A	-	4.4	6056.724	26810.74309
Blok B	-	110.2	2742.17	302134.8265
Tambahan	-	68.5	5329.039	364915.9177
Total			14127.93	693861.4873

$$\text{VCG total} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 49.11274 \text{ cm dari keel}$$

$$\text{Error} = \frac{\text{Model-Teori} - \text{Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% = -1.0\% \text{ memenuhi}$$

Perhitungan Girasi

Bagian		LCG (cm)	TCG (cm)	VCG from keel (cm)	Ditinjau dari COG (cm)	Massa (g)	Iox (g.cm)	Ioy (g.cm)	y^2+z^2	x^2+z^2	$w*(y^2+z^2)$	$w*(x^2+z^2)$	Ix (g.cm)	Iy (g.cm)
Blok A	Ballast 1	0.0	0.0	6.5	-42.6	1628.5	16446.1	16446.1	1815.8	1815.8	2957086.4	2957086.4	2973532.5	2973532.5
	Ballast 2	0.0	0.0	4.5	-44.6	1623.1	16391.5	16391.5	1990.3	1990.3	3230430.5	3230430.5	3246822.0	3246822.0
	Ballast 3	0.0	0.0	3.0	-46.1	2094.1	20624.6	20624.6	2126.4	2126.4	4452841.2	4452841.2	4473465.8	4473465.8
	Ballast 4	0.0	0.0	1.3	-47.9	663.6	6826.0	6826.0	2290.8	2290.8	1520179.6	1520179.6	1527005.6	1527005.6
	Cap	0.0	0.0	0.2	-49.0	47.5	471.3	471.3	2397.4	2397.4	113788.4	113788.4	114259.7	114259.7
Blok B	Ballast 7	0.0	0.0	112.1	62.9	179.5	1756.6	1756.6	3961.1	3961.1	710977.1	710977.1	712733.6	712733.6
	Ballast 6	0.0	0.0	111.4	62.3	466.0	4556.9	4556.9	3879.7	3879.7	1807902.1	1807902.1	1812459.0	1812459.0
	Ballast 5	0.0	0.0	109.8	60.6	2096.7	20748.5	20748.5	3676.9	3676.9	7709270.9	7709270.9	7730019.4	7730019.4
Tambahan	Ulir	0.0	0.0	65.3	16.2	352.1	495874.0	495874.0	262.0	262.0	92257.2	92257.2	588131.2	588131.2
	Pipa	0.0	0.0	61.7	12.6	4087.5	5287070.0	5287070.0	158.4	158.4	647624.4	647624.4	5934694.4	5934694.4
	Helical 1	7.8	0.0	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	83.9	23.9	8112.7	2308.3	109581.9	103777.5
	Helical 2	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	41.9	70.3	4053.8	6790.0	105523.1	108259.3
	Helical 3	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	41.9	70.3	4053.8	6790.0	105523.1	108259.3
	Topside	0.0	0.0	123.6	74.4	599.5	79937.8	79937.8	5540.9	5540.9	3321772.8	3321772.8	3401710.6	3401710.6
Total													32835461.9	32835129.9

5. Jari Jari Girasi

Rxx= 48.2095 cm

Ryy= 48.2092 cm

6. Check error

Err Rxx= -1.97% memenuhi

Err Ryy= -1.97% memenuhi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B

DESIAN TALI TAMBAT

- PEMILIHAN SPESIFIKASI WIRE ROPE

4

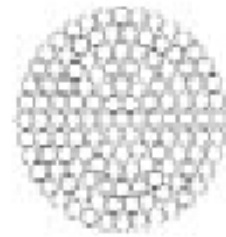
WIRE ROPE

ROPE SPECIFICATIONS

SPIRAL STRAND

4.34

- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations
Wear design calculation - Corrosion design calculation



Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area mm ²	MBF kN	Stiffness MN	Torque 25% MBF Nm	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m					
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

All dimensions are approximate

Spasifikasi wire rope dipilih

Diameter	115	mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBF	11760	kN
Kekakuan	1175	MN

- MODULUS ELASTISITAS SENAR PANCING (NYLON 6)
ENGINEERING TOOLBOX

Material	Tensile Modulus (E) (Young's Modulus, Modulus of Elasticity)		Ultimate Tensile Strength - σ_u - (MPa)	Yield Strength - σ_y - (MPa)
	(10^6 psi)	(GPa)		
ABS plastics		1.4 - 3.1	40	
A106 Seamless Carbon Steel Pipe - Grade A			400	248
Aluminum	10.0	69	110	95
Aluminum Alloys	10.2			
Nickel Silver	18.5			
Nickel Steel	29			
Niobium (Columbium)	15			
Nylon-6		2 - 4	45 - 90	45
Nylon-66			60 - 80	
Oak Wood (along grain)		11		
Osmium (Os)	80	550		
Phenol-formaldehyde molding compounds			45 - 52	

Sesuai bahan senar pancing yaitu dengan menggunakan nylon 6. Maka modulus elastisitasnya adalah 2 Gpa.

LAMPIRAN C

PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran	Periode10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran
1	34	3.4	34.5	3.45
2	34.2	3.42	34.2	3.42
3	34.3	3.43	35.1	3.51
4	34.3	3.43	34.2	3.42
5	34.4	3.44	34.6	3.46
6	34.3	3.43	34.4	3.44
7	34.3	3.43	34.2	3.42
8	34.4	3.44	34.7	3.47
9	34.7	3.47	34.5	3.45
10	34.7	3.47	34.7	3.47
11	33.9	3.39	34.5	3.45
12	33.9	3.39	34.5	3.45
13	34.3	3.43	34.3	3.43
14	33.9	3.39	34.7	3.47
15	34	3.4	34.2	3.42
16	34.3	3.43	34.7	3.47
17	34.5	3.45	34.5	3.45
18	34.4	3.44	34.6	3.46
19	34.4	3.44	34.9	3.49
20	34.4	3.44	35	3.5
21	34.5	3.45	35	3.5
22	34.5	3.45	35	3.5
23	34.2	3.42	34.9	3.49
24	34.2	3.42	35	3.5
25	34.4	3.44	34.9	3.49
26	34.5	3.45	34.9	3.49
27	34.4	3.44	34.5	3.45
28	34.4	3.44	34.5	3.45
29	34.5	3.45	34.8	3.48
30	34.5	3.45	35	3.5
31	34.6	3.46	35	3.5
32	34.2	3.42	35.2	3.52
33	34	3.4	34.7	3.47
34	34.1	3.41	34.5	3.45
35	34.4	3.44	34.7	3.47

PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR
(LANJUTAN)

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran	Periode10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran
36	34.3	3.43	34.2	3.42
37	34.5	3.45	35	3.5
38	34.5	3.45	35	3.5
39	34.1	3.41	35.2	3.52
40	34.6	3.46	35	3.5
41	34.5	3.45	34.5	3.45
42	34.7	3.47	34.7	3.47
43	34.7	3.47	34.7	3.47
44	34.6	3.46	34.7	3.47
45	34.4	3.44	34.7	3.47
46	34.2	3.42	34.6	3.46
47	34	3.4	34.6	3.46
48	34	3.4	34.5	3.45
49	34.3	3.43	35	3.5
50	34.4	3.44	35	3.5

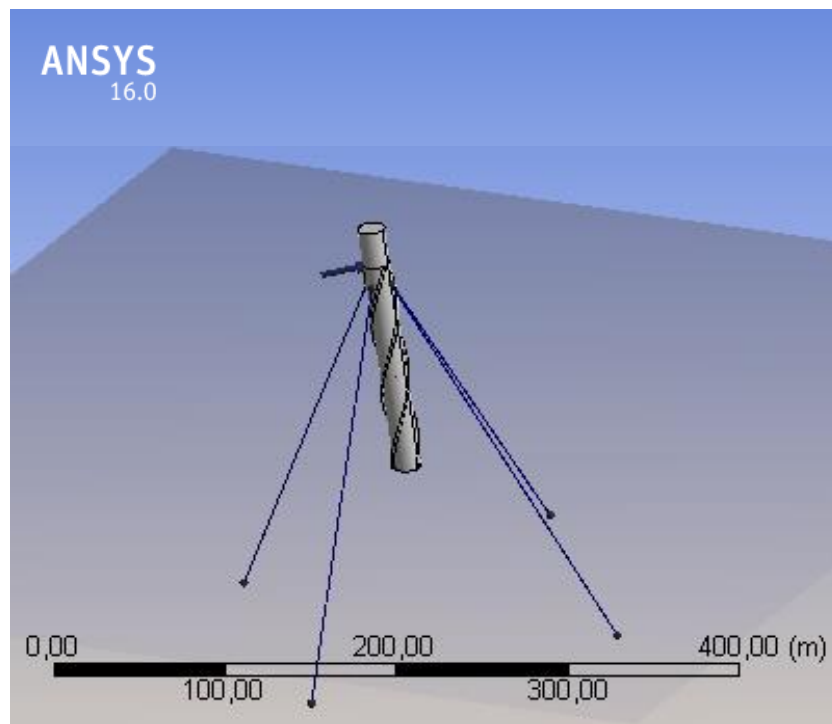
LAMPIRAN D

INPUT DAN OUTPUT ANSYS AQWA NUMERIS DAN TERTAMBAT



Project

Name	Project
Data Folder Root	Tugas Akhir
Date of Creation	19/04/2018 17:13:29
Last Modified	01/07/2018 13:18:01
Global Control	50
Geometric Features	50
Connections	50
Environment Features	50
Product Version	16.0 RELEASE



Units
TABLE 1

Length	Metre
Mass	Kilograms
Rotational Velocity	Degrees
Force	Newton
Frequency	Hertz
Time	Second

Model (A3, B3)
Geometry

TABLE 2
Model (A3, B3) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Details of Geometry	
Attached Assembly Name	C:\Users\pc\AppData\Local\Temp\WB_OPRESPC_pc_10436_2\unsaved_project_files\dp0\AQW\DM\AQW.agdb
Sea Geometry	
Water Depth	225 m
Water Density	1025 kg/m ³
Water Size X	1000 m
Water Size Y	1000 m
Import Preferences	
Import Solid Bodies	No
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	Yes

Part 3

TABLE 3
Model (A3, B3) > Geometry > Part

Object Name	<i>Part 3</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3	
Part Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Total Structural Mass	26837614,91 kg
X Position of COG	-6,82280340697616E-04 m
Y Position of COG	6,81083125527948E-04 m
Z Position of COG	-69,76 m
Generate Internal Lid	No
Current Calculation Depth	0.0 m
Fixity Options	
Structure Fixity	Structure is Free to Move

Force Factors	
Drag Factor	1
Mass Factor	1
Slam Factor	0.0
Advanced Options	
Submerged Structure Detection	Program Controlled
Override Calculated GMX	No
Override Calculated GMY	No
Non-Linear Roll Damping	
Non-Linear Roll Damping	Excluded from Calculations

TABLE 4
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 5
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 6
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Axes

Object Name	<i>Part 3 Axes</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3 Axes	
Visibility	Visible
Alignment Method	Global Axes
Rotation About Global Z	0.0°
Rotation About Local Y	0.0°
Rotation About Local X	0.0°
Unit Vector X	[1, 0.0, 0.0]
Unit Vector Y	[0.0, 1, 0.0]
Unit Vector Z	[0.0, 0.0, 1]

TABLE 7
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 8
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 9
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 10
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Point Mass

Object Name	<i>Point Mass</i>
State	Fully Defined
Details of Point Mass	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
X	-6,82280340697616E-04 m
Y	6,81083125527948E-04 m
Z	-69,76 m
Mass Definition	Manual
Mass	26837614,91 kg
Define Inertia Values by	via Radius of Gyration
Kxx	59,26 m

Kyy	59,26 m
Kzz	59,26 m
Ixx	94246929749,9167 kg.m ²
Ixy	0.0 kg.m ²
Ixz	0.0 kg.m ²
Iyy	94246929749,9167 kg.m ²
Iyz	0.0 kg.m ²
Izz	94246929749,9167 kg.m ²

TABLE 11

Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 5</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 5	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	8 m
Y	0.0 m
Z	-12,74 m

TABLE 12

Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 6</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 6	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-8 m
Y	0.0 m
Z	-12,74 m

TABLE 13

Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 7</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 7	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure

Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	8 m
Z	-12,74 m

TABLE 14
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 8</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 8	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-8 m
Z	-12,74 m

TABLE 15
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 1</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 1	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	130,55 m
Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 16
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 2</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 2	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-130,55 m

Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 17
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 3</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 3	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	130,55 m
Z	-225 m

TABLE 18
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 4</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 4	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-130,55 m
Z	-225 m

Connections

TABLE 19
Model (A3, B3) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Details of Connections	

TABLE 20
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data

Object Name	<i>Catenary Data</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Data	

TABLE 21
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data > Catenary Section

Object Name	<i>Catenary Section 1</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Section 1	
Section Properties	
Mass/Unit Length	65 kg/m
Equivalent Cross-Sectional Area	0,0104 m ²
Stiffness, EA	1175000000 N
Maximum Tension	11760000 N
Bending Stiffness, EI	0.0 N.m ²
Axial Stiffness Coefficient k1	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k2	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k3	0.0 N
Section Hydrodynamic Properties	
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter	0,115 m
Longitudinal Drag Coefficient	0,025

TABLE 22
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 6</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 6	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 2 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 6 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40

Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 23
Model (A3, B3) > Connections > Cable 6

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 24
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 7</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 7	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 4 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 8 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m

Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	0.0 N
Initial Cable Tension at End	0.0 N

TABLE 25
Model (A3, B3) > Connections > Cable 7

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 26
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 8</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 8	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 1 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 5 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary

Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 27
Model (A3, B3) > Connections > Cable 8

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 28
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 10</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 10	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 3 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 7 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 29
Model (A3, B3) > Connections > Cable 10

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115

Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

Mesh

TABLE 30
Model (A3, B3) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Meshed
Details of Mesh	
Defaults	
Global Control	Basic Controls
Mesh Parameters	
Defeaturing Tolerance	3 m
Max Element Size	6 m
Max Allowed Frequency	0,831 Hz
Meshing Type	Combined Meshing
Generated Mesh Information	
Number of Nodes	25261
Number of Elements	25281
Number of Diff Nodes	25152
Number of Diff Elements	25158

TABLE 31
Model (A3, B3) > Mesh > Mesh Sizing

Object Name	<i>Mesh Sizing</i>
State	Fully Defined
Details of Mesh Sizing	
Suppressed	Not Suppressed
Select Geometry	3 Bodies
Local Element Size	0,5 m

Hydrodynamic Diffraction (A4)

TABLE 32
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Diffraction (A4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Diffraction	
Analysis Type	Hydrodynamic Diffraction/Radiation

TABLE 33
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Parallel Processing	Program Controlled
Generate Wave Grid Pressures	Yes
Wave Grid Size Factor	2
Common Analysis Options	
Ignore Modelling Rule Violations	Yes
Calculate Extreme Low/High Frequencies	Yes
Calculate Drift Coefficients	Yes
Include Multi-Directional Wave Interaction	Yes
Near Field Solution	Program Controlled
Linearized Morison Drag	No
QTF Options	
Calculate Full QTF Matrix	Yes
Output File Options	
Full QTF Matrix	No
Field Point Wave Elevation	Yes
Source Strengths	No
Potentials	No
Centroid Pressures	No
Element Properties	No
ASCII Hydrodynamic Database	No
Example of Hydrodynamic Database	No

TABLE 34
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Gravity

Object Name	<i>Gravity</i>
State	Fully Defined
Details of Gravity	
Gravity	9,80665 m/s ²

TABLE 35
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Structure Selection

Object Name	<i>Structure Selection</i>
State	Fully Defined
Details of Structure Selection	
Structures to Exclude	None
Group of Structures	
Interacting Structure Groups	None
Structure Ordering	
Structure 1	Part 3

TABLE 36
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Direction

Object Name	<i>Wave Directions</i>
State	Fully Defined
Details of Wave Directions	
Type	Range of Directions, No Forward Speed
Required Wave Input	
Wave Range	-180° to 180°
Interval	45°
Number of Intermediate Directions	7
Optional Wave Directions A	
Additional Range	None
Optional Wave Directions B	
Additional Range	None
Optional Wave Directions C	
Additional Range	None
Optional Wave Directions D	
Additional Range	None

TABLE 37
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Frequency

Object Name	<i>Wave Frequencies</i>
State	Fully Defined
Details of Wave Frequencies	
Intervals Based Upon	Frequency
Frequency/Period Definition	
Range	Manual Definition
Definition Type	Range
Lowest Frequency Definition	Manual Definition
Lowest Frequency	0,025 Hz
Longest Period	40 s
Highest Frequency Definition	Manual Definition
Highest Frequency	0,3183 Hz
Shortest Period	3,14169 s
Number of Intermediate Values	32
Interval Frequency	0,00889 Hz
Additional Frequencies A	
Additional Range	None
Additional Frequencies B	
Additional Range	None
Additional Frequencies C	
Additional Range	None
Additional Frequencies D	
Additional Range	None

Solution (A5)

TABLE 38
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) >
Hydrostatic Results

Object Name	<i>Hydrostatic</i>
State	Solved
Details of Hydrostatic	
Structure	Part 3
Graphical Representation	
Show Centre of Gravity	Yes
Show Centre of Buoyancy	Yes
Show Centre of Floatation	Yes
Results	
Actual Displaced Volume	
Metacentric Height GMX	
Out of Balance Force/Weight, Fz	

TABLE 39
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) >
Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators)</i> <i>(Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global X
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,025
Minimum Value	0,002
Maximum Value	1,274
Line B	
Structure	Undefined...

Hydrostatic Results

Structure

Part 3

Hydrostatic Stiffness

Centre of Gravity (CoG) Position:	X:	-6.8228e-4 m	Y:	6.8108e-4 m	Z:	-69.760002 m
		Z		RX		RY
Heave (Z):		2036122.1 N		69.095848 N		93.822502 N
Roll (RX):		3958.9004 N.		18544390 N.		522.43787 N.
Pitch (RY):		5375.6333 N.		522.43787 N.		18549784 N.

Hydrostatic Displacement Properties

Actual Volumetric Displacement:	26540.377 m³
Equivalent Volumetric Displacement:	26183.039 m³

Centre of Buoyancy (CoB) Position:	X:	-6.8241e-4 m	Y:	6.8128e-4 m	Z:	-65.901443 m
Out of Balance Forces/Weight:	FX:	-1.1322e-6	FY:	4.7292e-7	FZ:	1.3659e-2
Out of Balance Moments/Weight:	MX:	4.1483e-5 m	MY:	3.1296e-5 m	MZ:	5.5172e-6 m

Cut Water Plane Properties

Cut Water Plane Area:					
Centre of Floatation:	X:	-3.3224e-3 m	Y:	2.6254e-3 m	
Principal 2nd Moment of Area:	X:	3295.877 m ⁴	Y:	3327.1912 m ⁴	
Angle Principal Axis makes with X(FRA):		5.4801879°			

Small Angle Stability Parameters

CoG to CoB (BG):		-3.8585603 m			
Metacentric Heights (GMX/GMY):		3.9827437 m		3.9839237 m	
CoB to Metacentre (BMX/BMY):		0.1241835 m		0.1253634 m	
Restoring Moments about Principal Axes (MX/MY):		18544340 N		18549832 N	

TABLE 40
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response
Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,27423965930939
0,03389 Hz	0,910169720649719
0,04278 Hz	0,6917804479599
0,05166 Hz	0,544902384281158
0,06055 Hz	0,437321126461029
0,06944 Hz	0,353785336017609
0,07833 Hz	0,28790870308876
0,08722 Hz	0,236033320426941
0,0961 Hz	0,195375457406044
0,10499 Hz	0,163382187485695
0,11388 Hz	0,137862652540207
0,12277 Hz	0,117065563797951
0,13165 Hz	9,96988192200661E-02
0,14054 Hz	8,48575085401535E-02
0,14943 Hz	7,19619914889336E-02
0,15832 Hz	6,11772909760475E-02
0,16721 Hz	5,12559674680233E-02
0,17609 Hz	4,27022874355316E-02
0,18498 Hz	3,53727526962757E-02
0,19387 Hz	2,92303208261728E-02
0,20276 Hz	2,41431556642056E-02
0,21165 Hz	1,99120230972767E-02
0,22053 Hz	1,64253227412701E-02
0,22942 Hz	1,35675938799977E-02
0,23831 Hz	1,12416157498956E-02
0,2472 Hz	9,34372097253799E-03
0,25608 Hz	7,79184373095632E-03
0,26497 Hz	6,49851001799107E-03
0,27386 Hz	5,38828410208225E-03
0,28275 Hz	4,73396899178624E-03
0,29164 Hz	3,9525399915874E-03
0,30052 Hz	3,31180822104216E-03
0,30941 Hz	2,76175234466791E-03
0,3183 Hz	2,26745335385203E-03

TABLE 41
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global Z
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,141
Position of Max in X	0,043
Minimum Value	2,2e-4
Maximum Value	10,402
Line B	
Structure	Undefined...

TABLE 42
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,11430060863495
0,03389 Hz	1,47169673442841
0,04278 Hz	10,4024295806885
0,05166 Hz	0,625064373016357
0,06055 Hz	0,152812778949738
0,06944 Hz	4,89389486610889E-02
0,07833 Hz	1,72751415520906E-02
0,08722 Hz	6,51185400784016E-03
0,0961 Hz	2,66876234672964E-03
0,10499 Hz	1,23585166875273E-03
0,11388 Hz	6,55088340863585E-04
0,12277 Hz	3,92330170143396E-04
0,13165 Hz	2,67464958596975E-04
0,14054 Hz	2,21711728954688E-04
0,14943 Hz	2,25677198613994E-04
0,15832 Hz	2,51727818977088E-04
0,16721 Hz	2,89440184133127E-04

0,17609 Hz	3,2861961517483E-04
0,18498 Hz	3,74582916265354E-04
0,19387 Hz	4,19539079302922E-04
0,20276 Hz	4,64058568468317E-04
0,21165 Hz	5,06952812429518E-04
0,22053 Hz	5,47593168448657E-04
0,22942 Hz	5,8303406694904E-04
0,23831 Hz	6,11881900113076E-04
0,2472 Hz	6,30663824267685E-04
0,25608 Hz	6,34396739769727E-04
0,26497 Hz	6,08757545705885E-04
0,27386 Hz	5,31589903403074E-04
0,28275 Hz	5,99862542003393E-04
0,29164 Hz	5,24351955391467E-04
0,30052 Hz	4,56246139947325E-04
0,30941 Hz	3,93692083889619E-04
0,3183 Hz	3,37320700054988E-04

TABLE 43
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global RY
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,069
Minimum Value	0,004
Maximum Value	0,24
Line B	
Structure	Undefined...

TABLE 44
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (°/m)
0,025 Hz	0,203812978235313
0,03389 Hz	0,189928817818477
0,04278 Hz	0,205363444517119
0,05166 Hz	0,224658848984324
0,06055 Hz	0,237499204417551
0,06944 Hz	0,23976423922063
0,07833 Hz	0,23314231745945
0,08722 Hz	0,220483655730316
0,0961 Hz	0,204439287905904
0,10499 Hz	0,186911435010278
0,11388 Hz	0,169084761338464
0,12277 Hz	0,151599823908775
0,13165 Hz	0,134746051987291
0,14054 Hz	0,118656180695577
0,14943 Hz	0,103433896840907
0,15832 Hz	8,98426608260147E-02
0,16721 Hz	7,66768108602606E-02
0,17609 Hz	6,48748442840736E-02
0,18498 Hz	5,44641185397201E-02
0,19387 Hz	0,045527543052379
0,20276 Hz	3,79772891932456E-02
0,21165 Hz	3,15987996429529E-02
0,22053 Hz	2,62682938980608E-02
0,22942 Hz	2,18478341538469E-02
0,23831 Hz	1,82079336306652E-02
0,2472 Hz	1,52133192313844E-02
0,25608 Hz	1,27473007758925E-02
0,26497 Hz	1,06818455677847E-02
0,27386 Hz	8,86923158970297E-03
0,28275 Hz	7,81815702365125E-03
0,29164 Hz	6,55631876136774E-03
0,30052 Hz	5,51181425032819E-03
0,30941 Hz	4,60868306579766E-03
0,3183 Hz	3,7908567084829E-03

Hydrodynamic Response (B4)

TABLE 45
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Response (B4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Response	
Analysis Type	Hydrodynamic Time Response

TABLE 46
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Computation Type	Time Response Analysis
Parallel Processing	Program Controlled
Use Cable Dynamics	Yes
Time Response Specific Options	
Analysis Type	Regular Wave Response
Start Time	0.0 s
Time Step	1 s
Duration	3600 s
Number of Steps	3601
Finish Time	3600 s
Starting Position	Program Controlled
Common Analysis Options	
Convolution	Yes
Call Routine "user_force"	No
Use Linear Starting Conditions	No
Use Linear Stiffness Matrix to Calculate Hydrostatic	No
Account for Current Phase Shift	Yes
Use Wheeler Stretching	No
Tube Drag Coefficients	Defined in Geometry
Output File Options	
Joint Axis System for Joint Reaction Force	Fixed Reference Axes
Data List	Yes
Element Properties	No

TABLE 47
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Regular Wave

Object Name	<i>Regular Wave 1</i>
State	Fully Defined
Details of Regular Wave 1	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed

Wave Definition	
Wave Type	Airy Wave Theory
Direction	0°
Amplitude	1 m
Period	25,1818 s
Frequency	3,97112200081011E-02 Hz
Ramping Method	Program Controlled

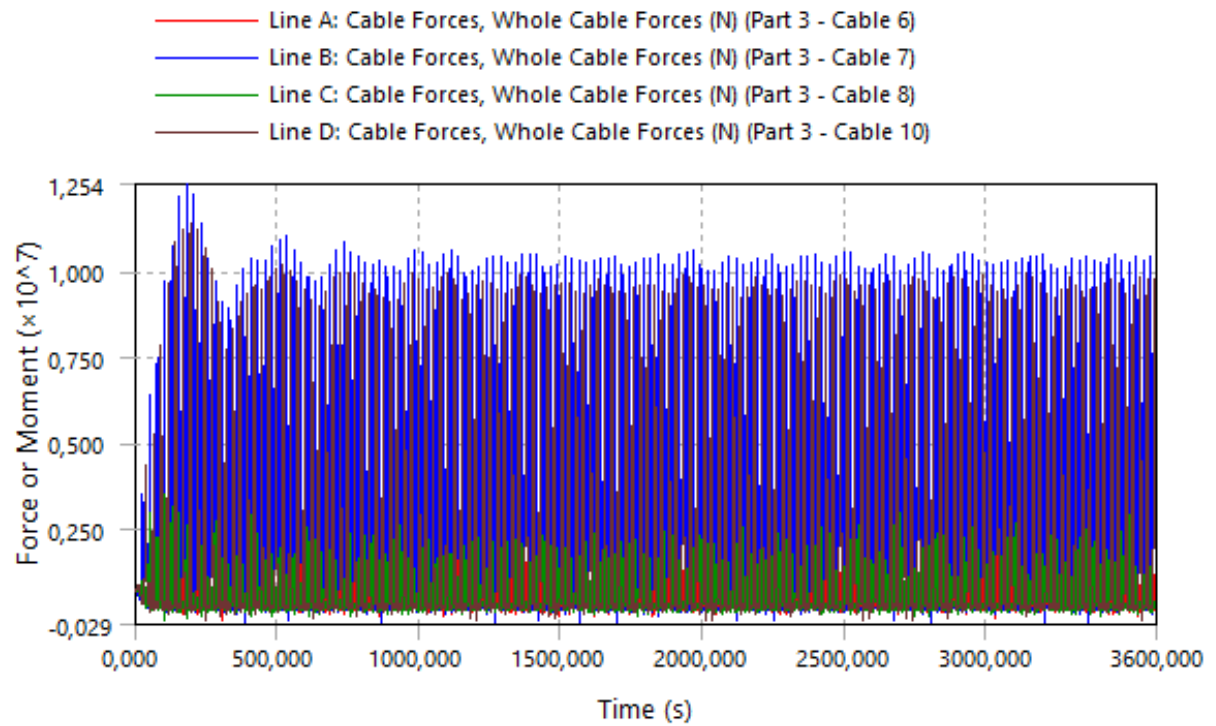
Solution (B5)

TABLE 48
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>Cable Forces, Whole Cable Forces</i>
State	Solved
Details of Cable Forces, Whole Cable Forces	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Force/Moment vs Time
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 6
Position of Min in X	308
Position of Max in X	457
Minimum Value	-149667,406
Maximum Value	3758483,25
Line B	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 7
Position of Min in X	3357
Position of Max in X	180
Minimum Value	-288546,094
Maximum Value	12542441
Line C	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 8
Position of Min in X	104

Position of Max in X	102
Minimum Value	-168373,578
Maximum Value	3506300,25
Line D	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 10
Position of Min in X	2565
Position of Max in X	194
Minimum Value	-185135,031
Maximum Value	11373993

FIGURE 4
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Cable Forces, Whole Cable Forces



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN E

SCRIPT MATLAB FFT

```
clc;clear; close all;
warning off MATLAB:divideByZero
sheet = 'sheet3'
A = xlsread('DATA MENTAH TERTAMBAT TEGANGAN TALI',sheet);
t = A(:,1);
s = A(:,2);
h = A(:,3);
p = A(:,4);
f1 = A(:,5);
f2 = A(:,6);
f3 = A(:,7);
f4 = A(:,8);

sfr = 1;
t = (1:length(t))/sfr;

shpf = [s,h,p,f1,f2,f3,f4];
for i=1:7
    subplot(7,1,i)
    plot(t,shpf(:,i));
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

[xb,yb]=ginput(2);
BatasBawah = max(round(xb(1)*sfr),1);
BatasAtas = min(round(xb(2)*sfr),size(s,1));
k = BatasBawah:BatasAtas;lenk = length(k);

tk =(BatasBawah:BatasAtas)/sfr;
sk = s(k);
hk = h(k);
pk = p(k);
f1k= f1(k);
f2k= f2(k);
f3k= f3(k);
f4k= f4(k);
shpfk = [sk,hk,pk,f1k,f2k,f3k,f4k];
```

```

figure;
for i=1:7
    subplot(7,1,i)
    plot(t,shpf(:,i),tk,shpfk(:,i),'r');
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

```

```

figure;
for i=1:7
    Yf = shpf(:,i);
    lenk = length(Yf);
    sr=1/sfr;
    TT = (0:lenk-1)./sfr;
    tmax=TT(end)-TT(1);
    fdf=1/lenk/sr;
    ff=(0:fd:1/2/sr);
    FF=sr*fft(Yf);
    fampl=2/(tmax+sr)*abs(FF);
    TT = (0:lenk-1)./sfr;
    tmax=TT(end)-TT(1);
    fdf=1/lenk/sr;
    ff=(0:fd:1/2/sr);
    FF=sr*fft(Yf);
    ampl=2/(tmax+sr)*abs(FF);
    periode(:,i)=(1./(ff(1:length(ff))))';
    Ampl(:,i)=ampl(1:length(ff));
    subplot(7,1,i)
    plot(periode(:,i),Ampl(:,i));
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

```

```
period= periode(2:end,1)
hasil = Ampl(2:end,:)
[Amplheave,n] = max(hasil(:,2));
Period  = period(n)
Amplsurge = hasil(n,1)
Amplheave
Amplpitch = hasil(n,3)
Amplf1    = hasil(n,4)
Amplf2    = hasil(n,5)
Amplf3    = hasil(n,6)
Amplf4    = hasil(n,7)
```

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN F TERTAMBAT *TAUT*

NUMERIS

Periode		Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A	RAO Tension B	RAO Tension C	RAO Tension D
FFT (s)	Real (s)	Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
40,0111	40	0,0250	0,1571	1,937	0,620	1,350	0,432	13,363	4,276	224,811	224,811	213,299	217,333
38,3211	38	0,0263	0,1653	1,759	0,563	0,800	0,256	11,515	3,685	211,380	211,380	180,788	187,350
34,9128	35	0,0286	0,1795	3,915	1,253	1,893	0,606	4,028	1,289	147,856	144,869	107,608	89,946
33,0367	33	0,0303	0,1904	4,272	1,367	1,346	0,431	6,547	2,095	209,501	209,501	162,416	127,153
29,5164	29,5072	0,0339	0,2129	2,717	0,869	1,055	0,337	2,163	0,692	103,829	79,803	64,356	49,497
25,1818	25,1193	0,0398	0,2501	1,951	0,624	0,707	0,226	1,662	0,532	100,652	91,213	79,850	71,417
23,3831	23,3754	0,0428	0,2688	1,977	0,632	1,138	0,364	1,365	0,437	81,087	79,796	70,418	68,981
21,8242	21,8627	0,0457	0,2874	1,450	0,464	1,074	0,344	0,901	0,288	53,962	56,521	42,362	44,570
19,3602	19,3573	0,0517	0,3246	1,458	0,467	2,430	0,778	1,052	0,337	139,395	139,395	79,701	88,557
15,8738	16,0000	0,0625	0,3927	0,996	0,319	0,278	0,089	0,670	0,214	45,671	41,403	27,294	24,143
14,404	14,4009	0,0694	0,4363	0,842	0,269	0,098	0,031	0,664	0,212	44,458	45,627	21,442	20,910
12,7695	12,7665	0,0783	0,4922	0,575	0,184	0,172	0,055	0,405	0,129	46,646	68,919	29,499	26,724
5,6798	5,6789	0,1761	1,1064	0,085	0,027	0,003	0,001	0,130	0,041	7,696	8,036	7,385	7,743

EKSPERIMEN

Periode		Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A	RAO Tension B	RAO Tension C	RAO Tension D
Eks(s)	Real (s)	Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
3,6	40,2492	0,0248	0,1571	1,042	0,417	0,103	0,065	0,065	0,0783	55,224	56,061	42,520	43,200
2,6	29,0689	0,0344	0,2129	1,512	0,605	0,187	0,198	0,108	0,2816	95,982	97,436	58,493	59,429
2,1	23,4787	0,0426	0,2688	1,235	0,494	0,150	0,178	0,178	0,0962	93,571	94,988	76,040	77,257
1,7	19,0066	0,0526	0,3246	1,184	0,474	0,156	0,296	0,196	0,1736	117,313	119,091	78,740	80,000
1,3	14,5344	0,0688	0,4363	0,757	0,303	0,082	0,082	0,082	0,1492	50,149	50,909	24,882	25,280
1,1	12,2984	0,0813	0,4922	0,538	0,215	0,081	0,081	0,081	0,1351	44,776	45,455	10,709	10,880
0,5	5,5902	0,1789	1,1064	0,027	0,011	0,067	0,067	0,067	0,0015	1,658	1,684	2,100	2,133

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN G

TERTAMBAT CATENARY 1

NUMERIS

Periode		Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A	RAO Tension B	RAO Tension C	RAO Tension D
FFT (s)	Real (s)	Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
40,0111	40	0,0250	0,1571	2,359	0,755	1,714	0,549	10,387	3,324	197,708	196,378	188,947	189,067
38,3211	38	0,0263	0,1653	2,981	0,954	1,718	0,550	4,559	1,459	134,331	147,676	79,253	70,328
34,9128	35	0,0286	0,1795	4,379	1,401	1,011	0,324	6,597	2,111	156,042	154,497	98,939	98,939
33,0367	33	0,0303	0,1904	3,041	0,973	1,233	0,395	2,398	0,767	87,718	67,461	54,377	55,362
29,5164	29,5072	0,0339	0,2129	1,960	0,627	0,412	0,132	1,021	0,327	67,993	66,933	32,887	39,512
25,1818	25,1193	0,0398	0,2501	1,536	0,491	1,151	0,368	0,772	0,247	51,128	51,787	32,202	38,638
23,3831	23,3754	0,0428	0,2688	1,795	0,574	1,616	0,517	1,027	0,329	51,944	53,757	41,522	35,533
21,8242	21,8627	0,0457	0,2874	1,502	0,481	1,852	0,593	1,006	0,322	61,544	55,297	46,849	45,554
19,3602	19,3573	0,0517	0,3246	1,571	0,503	2,763	0,884	1,160	0,371	70,367	75,313	63,534	63,902
15,8738	16,0000	0,0625	0,3927	0,944	0,302	1,087	0,348	0,593	0,190	38,106	34,227	19,615	19,589
14,404	14,4009	0,0694	0,4363	0,789	0,252	0,928	0,297	0,567	0,181	31,509	31,059	16,329	17,013
12,7695	12,7665	0,0783	0,4922	0,639	0,204	0,587	0,188	0,536	0,172	38,410	44,040	17,766	16,952
5,6798	5,6789	0,1761	1,1064	0,082	0,026	0,003	0,001	0,125	0,040	1,329	1,389	1,225	1,290

EKSPERIMEN

Periode		Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A	RAO Tension B	RAO Tension C	RAO Tension D
Eks(s)	Real (s)	Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
3,6	40,2492	0,0248	0,1571	1,042	0,1175	0,1034	0,0665	0,0645	0,0141	10,000	12,000	3,227	0,000
2,6	29,0689	0,0344	0,2129	1,512	0,7124	0,1865	0,3092	0,1078	0,2441	72,250	86,700	49,636	0,000
2,1	23,4787	0,0426	0,2688	1,235	0,4084	0,1501	0,4223	0,1780	0,1406	52,150	62,580	40,864	0,000
1,7	19,0066	0,0526	0,3246	1,184	0,4200	0,1557	0,5606	0,1957	0,1930	61,500	73,800	54,864	0,000

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN H
TERTAMBAT *CATENARY 2*

NUMERIS

Periode		Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A	RAO Tension B	RAO Tension C	RAO Tension D
FFT (s)	Real (s)	Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
40,0111	40	0,0250	0,1571	3,351	1,072	2,402	0,769	3,407	1,090	85,526	85,526	59,613	61,841
38,3211	38	0,0263	0,1653	4,463	1,428	1,477	0,472	6,651	2,128	154,298	154,298	111,958	113,719
34,9128	35	0,0286	0,1795	2,736	0,875	1,258	0,402	1,168	0,374	33,580	35,628	29,748	30,257
33,0367	33	0,0303	0,1904	2,423	0,775	1,650	0,528	1,011	0,324	31,036	31,435	23,243	23,063
29,5164	29,5072	0,0339	0,2129	2,027	0,648	1,881	0,602	0,853	0,273	25,715	27,046	21,877	21,220
25,1818	25,1193	0,0398	0,2501	1,640	0,525	2,232	0,714	0,872	0,279	50,931	52,505	44,614	47,312
23,3831	23,3754	0,0428	0,2688	2,005	0,642	2,816	0,901	1,322	0,423	81,123	81,830	65,647	62,552
21,8242	21,8627	0,0457	0,2874	1,416	0,453	1,699	0,544	0,675	0,216	51,376	52,456	41,476	41,110
19,3602	19,3573	0,0517	0,3246	1,217	0,389	1,067	0,341	0,601	0,192	38,054	38,054	24,850	25,665
15,8738	16,0000	0,0625	0,3927	0,912	0,292	0,789	0,252	0,512	0,164	31,857	31,442	10,031	9,884
14,404	14,4009	0,0694	0,4363	0,636	0,203	0,956	0,306	0,398	0,127	43,916	44,833	20,134	22,435
12,7695	12,7665	0,0783	0,4922	0,563	0,180	0,361	0,115	0,613	0,196	14,896	14,825	8,145	7,798
5,6798	5,6789	0,1761	1,1064	0,079	0,025	0,003	0,001	0,121	0,039	0,229	0,235	0,202	0,209

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Ahmad Fahcruddin atau yang biasa dipanggil Rudi lahir di Desa Mulyoagung Kecamatan Singgahan Kabupaten Tuban pada 18 Februari 1996, merupakan anak pertama dari pasangan yang sangat berbahagia Hari Purwanto dan Hidayatun Ni'mah. Penulis menempuh pendidikan formal di MI Islamiyah Mulyoagung, SMPN 1 Singgahan, dan SMAN 1 Bojonegoro. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan akademik dan organisasi. Pada tahun 2016 penulis mengikuti program kreatifitas mahasiswa (PKM) yang diselenggarakan oleh dikti. Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) yang diikuti oleh penulis adalah UKM PSHT sebagai siswa pada tahun 2014-2015 dan UKM Sepak Bola ITS pada tahun 2014-2018. Penulis mewakili ITS dalam beberapa turnamen sepakbola sebagai penjaga gawang pada tahun 2017 dan 2018. Organisasi Mahasiswa intra kampus yang diikuti penulis adalah Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (HIMATEKLA) pada tahun 2015 sebagai *staff* Departemen Kastrat HIMATEKLA dan tahun 2016 sebagai kepala divisi Eksternal Kastrat, BEM FTK pada tahun 2015 sebagai kepala divisi Kajian Kastrat, Lembaga dakwah Jurusan (LDJ) Bahrul Ilmi sebagai ketua departemen Syiar pada tahun 2015. Penulis juga aktif di organisasi ekstra kampus Himpunan Mahasiswa Islam (HMI). Tahun 2017 penulis diamanahi menjadi sekretaris umum HMI Komisariat Perkapalan Sepuluh Nopember dan tahun 2018 sebagai wakil sekretaris umum litbang HMI cabang Surabaya. Penulis melakukan Kerja praktek di PT. Bakrie Construction selama dua bulan pada tahun 2017. di tahun 2018 sebagai tehun terakhir penulis juga menjadi pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dan mengerjakan Tugas Akhir.

Email: afahcruddin@gmail.com